



MANUAL  
Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología:  
Observación y predicción del clima, de los fenómenos  
meteorológicos y de los recursos hídricos  
Edición 2017







# MANUAL

## Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología: Observación y predicción del clima, de los fenómenos meteorológicos y de los recursos hídricos

Edición 2017

Oficina de Radiocomunicaciones



## NOTA

Las denominaciones empleadas en las publicaciones de la UIT y la OMM y la forma en que aparecen presentados los datos que contienen no entrañan, de parte de ninguna Organización, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios, ciudades o zonas citados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

Las opiniones expresadas en las publicaciones de la UIT y de la OMM son las de sus autores y pueden diferir de las de la UIT y la OMM. La mención de determinados productos o sociedades mercantiles no implica que la UIT y la OMM los favorezcan o recomienden con preferencia a otros análogos que no se mencionan ni se anuncian.

La correspondencia editorial, así como todas las solicitudes para publicar, reproducir o traducir la presente publicación parcial o totalmente deberán dirigirse al:

Presidente de la Junta de publicaciones  
Organización Meteorológica Mundial (OMM)  
7 bis, avenue de la Paix  
P.O. Box 2300  
CH-1211 Ginebra 2, Suiza

Tel.: +41 (0) 22 730 84 03  
Fax: +41 (0) 22 730 81 17  
Correo electrónico: [publications@wmo.int](mailto:publications@wmo.int)

## UIT

978-92-61-24873-4 (versión en papel)  
978-92-61-24883-3 (versión electrónica)

## OMM

OMM-Núm. 1197  
978-92-63-31197-9 (versión electrónica)

## PREFACIO

«El cambio climático es una amenaza directa por sí mismo y un factor multiplicador de muchas otras amenazas, desde la pobreza a los desplazamientos y los conflictos»

António Guterres, Secretario General de las Naciones Unidas

Congreso Meteorológico Mundial de la OMM (Ginebra, 2015), Resolución 29 (Cg-17):

**Considerando:**

(1) la importancia primordial de servicios de radiocomunicación específicos para las actividades meteorológicas y medioambientales conexas, necesarias para la detección y la alerta temprana de los riesgos y la prevención y la atenuación de los efectos de los desastres naturales y tecnológicos (de origen humano), la seguridad de la vida humana y la propiedad, la protección del medio ambiente, los estudios sobre el cambio climático y la investigación científica;

...

**Recalcando** que algunas bandas de frecuencias radioeléctricas son un recurso natural único debido a sus características especiales y radiación natural que permiten la teledetección pasiva a bordo de vehículos espaciales de la atmósfera y la superficie de la Tierra, que merecen una atribución adecuada al servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasiva) y protección absoluta contra las interferencias;

...

**Insta** a todos los Miembros a que hagan todo lo posible para asegurar la disponibilidad y protección de las bandas de frecuencias radioeléctricas necesarias;

...

**Hace un llamamiento** a la Unión Internacional de Telecomunicaciones y a sus Estados Miembros:

(1) para que garanticen la disponibilidad y absoluta protección de las bandas de frecuencias radioeléctricas que, debido a sus características físicas especiales, son un recurso natural único para la teledetección pasiva a bordo de vehículos espaciales de la atmósfera y la superficie de la Tierra, y de importancia fundamental para la investigación y las operaciones relativas al tiempo, el agua y el clima;

(2) para que presten la debida consideración a las necesidades de la OMM en materia de atribuciones de frecuencias radioeléctricas y las disposiciones reglamentarias para las operaciones e investigaciones meteorológicas y medioambientales conexas;

...

Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la UIT (Ginebra, 2012), Resolución 673 (CMR-12):

*considerando*

...

b) que los datos de observación de la Tierra también son indispensables para la supervisión y predicción de los cambios climáticos, para la predicción y supervisión de las catástrofes y para la mitigación de sus efectos, para mejorar el conocimiento, la elaboración de modelos y la verificación de todos los aspectos del cambio climático, y para la formulación de políticas en esta materia;

...

e) que muchas observaciones se realizan en todo el mundo, por lo que los temas relativos al espectro deben considerarse a nivel mundial;

...

h) que las observaciones de la Tierra se efectúan en beneficio de toda la comunidad internacional y que generalmente los datos se ponen a disposición sin coste alguno,

...

*resuelve*

1 seguir reconociendo que el uso del espectro para aplicaciones de observación de la Tierra presenta un considerable valor económico y social;

2 instar a las administraciones a tener en cuenta las necesidades de radiofrecuencia de los servicios de observación de la Tierra y, en particular, la protección de las bandas de frecuencia correspondientes;

3 alentar a las administraciones a tener en cuenta la importancia de la utilización y disponibilidad de espectro para las aplicaciones de observación de la Tierra antes de tomar decisiones que puedan afectar negativamente a dichas aplicaciones.

Entre 1970 y 2015, más de 12 000 catástrofes naturales en todo el mundo se cobraron las vidas de más de 3,5 millones de personas y produjeron unas pérdidas económicas estimadas en más de 2,7 billones de USD. Del 90% de estas catástrofes naturales, más de 60% de las víctimas y 70% de las pérdidas económicas se debieron a catástrofes provocadas por fenómenos meteorológicos o relacionados con el agua tales como sequías, inundaciones, intensas tormentas y ciclones tropicales, así como epidemias y plagas de insectos directamente relacionadas con condiciones meteorológicas e hidrológicas. Estas situaciones extremas se están intensificando con el cambio climático, el «reto decisivo de nuestro tiempo», y seguirán intensificándose si no las tenemos en cuenta. Existen pruebas científicas fehacientes que demuestran que el cambio climático constituirá una amenaza para el desarrollo económico, la prosperidad a largo plazo y el bienestar social de casi todos los países, así como para la mera supervivencia de las poblaciones más vulnerables.

Las tecnologías e infraestructuras de observación y supervisión desempeñan un papel fundamental para comprender y afrontar el cambio climático y sus consecuencias. Actualmente las aplicaciones basadas en radiocomunicaciones, tales como los instrumentos de teledetección a bordo de satélites y en la superficie de la Tierra (p. ej. radares meteorológicos), son la fuente principal de información sobre la atmósfera y la superficie de la Tierra. A su vez, esta información se utiliza para la observación, predicción y avisos relativos al clima, a los fenómenos meteorológicos y a los recursos hídricos, la reducción de los riesgos de catástrofes naturales, el apoyo a operaciones de socorro y salvamento y la planificación de medidas preventivas para adaptarse a los efectos negativos del cambio climático y disminuir las consecuencias del mismo.

A tal efecto, cabe destacar las observaciones continuas y la supervisión a largo plazo de la actividad solar, a fin de tener una comprensión más cabal de la influencia de la radiación electromagnética procedente del Sol en el medio ambiente de la Tierra, incluido su clima; las observaciones continuas para caracterizar los cambios producidos en la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y la criósfera, y la utilización de esa información para establecer modelos relativos al cambio climático; y por último, las observaciones continuas de la variación de la capa de ozono y de su incidencia en el medio ambiente y en la salud humana. La evaluación de la transformación de la capa terrestre y la comprensión de su evolución se consideran requisitos esenciales a los efectos de gestión sostenible de los recursos naturales, protección del medio ambiente, seguridad alimentaria, cambio climático y establecimiento de programas humanitarios. Los sistemas de radiocomunicaciones terrenales y por satélite permiten vigilar las emisiones de carbono, la variación de la capa de hielo en los casquetes polares y en los glaciares, y los cambios de temperatura.

Desde hace más de 140 años, la Unión Telegráfica Internacional y la Organización Meteorológica Internacional, como se llamaban a finales del siglo XIX, que posteriormente pasarían a llamarse, respectivamente, Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y Organización Meteorológica Mundial (OMM) en la década de 1950, tiene lugar una fructífera colaboración y asociación entre estos organismos internacionales especializados en meteorología y en telecomunicaciones. Mientras la OMM centra sus esfuerzos en satisfacer las necesidades de información sobre el medio ambiente y los correspondientes recursos del espectro de radiofrecuencias para aplicaciones normalizadas sobre meteorología, climatología e hidrología, la UIT, como organismo internacional controlador del espectro radioeléctrico, asigna las radiofrecuencias necesarias para permitir un funcionamiento sin interferencias de las aplicaciones radioeléctricas y los sistemas de radiocomunicaciones (terrenales y espaciales) utilizados para la observación y predicción del clima, las predicciones meteorológicas y los avisos tempranos y detección de catástrofes naturales.

Las sucesivas Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones de la UIT han tenido en cuenta las necesidades de la OMM para garantizar la disponibilidad y protección de las bandas de radiofrecuencias utilizadas por las herramientas de observación atmosférica y medioambiental tales como radiosondas, radares meteorológicos y de perfil del viento y sondas de microondas e infrarrojas a bordo de vehículos espaciales.

Esta nueva versión del Manual sobre Utilización del espectro radioeléctrico en meteorología: Observación y previsión del clima, de los fenómenos meteorológicos y de los recursos hídricos, ha sido elaborado conjuntamente por expertos del Grupo de Trabajo 7C del UIT-R bajo la presidencia del Sr. M. Dreis (EUMETSAT) de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones (Servicios Científicos) y del Grupo de Dirección sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones (SG-RFC) de la Comisión de Sistemas Básicos (CBS) de la OMM, bajo la presidencia del Sr. Eric Allaix (Francia).

El Manual contiene información técnica y operacional completa sobre las actuales aplicaciones y sistemas de observación y sobre la utilización de frecuencias radioeléctricas por sistemas meteorológicos, incluidos satélites meteorológicos, radiosondas, radares meteorológicos, radares de perfil del viento y sistemas de teledetección a bordo de vehículos espaciales. Está destinado a las comunidades meteorológica (es decir, la que estudia los fenómenos meteorológicos, los recursos hídricos y el clima) y de radiocomunicaciones, incluidas las instituciones gubernamentales, la industria y el público en general.



Sr. Petteri Taalas  
Secretario General  
Organización Meteorológica Mundial



Sr. Houlin Zhao  
Secretario General  
Unión Internacional de Telecomunicaciones



## ÍNDICE

	<i>Página</i>
PRÓLOGO .....	ix
INTRODUCCIÓN.....	xi
CAPÍTULO 1 – Estructura general de los sistemas meteorológicos.....	1
CAPÍTULO 2 – Servicio de meteorología por satélite (MetSat).....	9
CAPÍTULO 3 – Servicio de ayuda a la meteorología .....	21
CAPÍTULO 4 – Radares meteorológicos.....	37
CAPÍTULO 5 – Teledetección pasiva y activa a bordo de vehículos espaciales para actividades meteorológicas .....	75
CAPÍTULO 6 – Otros sistemas de radiocomunicaciones para actividades meteorológicas .....	105
Anexo 1 – Acrónimos y abreviaturas de uso común en meteorología .....	115



## PRÓLOGO

La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones sobre Servicios Científicos se constituyó con ocasión de una reestructuración que tuvo lugar en la Asamblea Plenaria del CCIR en 1990 en Düsseldorf.

La Comisión de Estudio 7 está formada por varios Grupos de Trabajo (GT) de Radiocomunicaciones que se ocupan de cuestiones técnicas relativas a disciplinas específicas del ámbito de los servicios científicos. La meteorología y las actividades conexas sobre el medio ambiente son competencia del Grupo de Trabajo 7C (GT 7C), que lleva a cabo estudios relativos a la implementación y explotación de los sensores meteorológicos activos y pasivos, desde estaciones situadas en tierra o en plataformas espaciales, así como de las ayudas a la meteorología (fundamentalmente radiosondas). Como la meteorología también depende de las radiocomunicaciones para recopilar datos sobre los que basar sus predicciones y para procesar y divulgar la información y las alertas meteorológicas entre la población, esta actividad concierne al GT 7B. Por último puede observarse que los radares meteorológicos y de perfil del viento se estudian en el seno del GT 5B en el contexto del servicio general de radiolocalización.

La meteorología es una parte fundamental de nuestra vida y está estrechamente relacionada con nuestras rutinas y actividades cotidianas. Las predicciones meteorológicas son hoy uno de los programas más populares de televisión y de radio porque influyen nuestra manera de vestir o nuestras actividades y tienen muchas implicaciones sobre la seguridad pública. Los transportes públicos dependen en gran medida de la meteorología y poder predecir el tiempo con precisión es esencial para proporcionar servicios de alto nivel a la sociedad y, en particular, proteger la vida humana y las propiedades en muchos sectores tales como el transporte y, especialmente, la aviación. En esta época de grandes perturbaciones meteorológicas y climáticas, esta actividad también es fundamental en la predicción, detección y disminución de los efectos negativos de las catástrofes naturales.

La elaboración de Recomendaciones y la preparación de las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) es el tema principal de las actividades de la Comisión de Estudio. Es absolutamente necesario que los expertos de la Comisión de Estudio 7 compartan esta información con sus colegas cuyo trabajo depende de datos meteorológicos para mejorar la precisión de las predicciones meteorológicas y climatológicas, y también con una audiencia más general a fin de que las personas interesadas puedan entender la importancia de utilizar frecuencias específicas para fines meteorológicos y las formas de protegerlas con objeto de poder seguir realizando predicciones meteorológicas con el mayor grado de fiabilidad posible.

Por consiguiente, se decidió elaborar y publicar este Manual, en colaboración con el Grupo de Dirección sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones (SG-RFC) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), destinado a que los usuarios de estas normas puedan profundizar en el conocimiento de los sistemas meteorológicos para mejorar el diseño y la aplicación de estas potentes herramientas. Un objetivo fundamental de este Manual es informar a los lectores acerca de la utilización de los sistemas de radiocomunicaciones y de las bandas de radiofrecuencia (RF) por parte de los meteorólogos y de otros científicos interesados en actividades del medio ambiente de todo el mundo, y de su importancia para la seguridad pública y la economía mundial.

Una gestión eficaz y prudente de la atribución de bandas de frecuencias es decisiva para mantener y mejorar la calidad y precisión de las predicciones meteorológicas y de las predicciones relativas al clima. Es esencial entender, por ejemplo, que si algunas de las bandas de frecuencias actualmente atribuidas para fines meteorológicos tuvieran que ser utilizadas por otros sistemas de radiocomunicaciones incompatibles con los sistemas de radiocomunicaciones meteorológicos, estas bandas podrían quedar inutilizables para los sistemas de previsión meteorológica, climatológica y/o de catástrofes, haciendo muy difícil e incluso imposible las predicciones con la fiabilidad y precisión necesarias.

Como Presidente de la Comisión de Estudio 7, me complace presentar este Manual a los usuarios de las normas meteorológicas y a los gestores de frecuencias en general para los que, no me cabe duda, constituirá una importante herramienta de consulta en el ámbito de su propio trabajo.

El Manual no podría haberse completado sin la contribución de las numerosas administraciones que participan en la Comisión de Estudio 7 y el SG-RFC. Además, debe señalarse el excepcional trabajo de los Relatores de los diversos capítulos del Manual y agradecer especialmente la dirección de este proyecto al Sr. David Franc (EE.UU.), el Sr. Gilles Fournier (Canadá), el Sr. Eric Allaix (Francia), el Sr. David Thomas (OMM), el Sr. Philippe Tristant (EUMETNET) y el Sr. Markus Dreis (EUMETSAT).

También merece nuestra más sincera gratitud el Sr. Vadim Nozdrin de la Oficina de Radiocomunicaciones que ha desempeñado una función importante en la publicación del Manual.

John Zuzek  
Presidente de la Comisión de Estudio 7  
de Radiocomunicaciones

## INTRODUCCIÓN

Un aviso a tiempo de catástrofes naturales y medioambientales inminentes, una predicción precisa del clima y una comprensión, conservación y gestión eficaces de recursos escasos tales como biomasa, biosfera, minerales, agua y energía son esenciales para el desarrollo económico sostenible. La información sobre el clima, el cambio climático, el tiempo, la criósfera, las precipitaciones, la contaminación o las catástrofes son fundamentales cotidianamente para la comunidad mundial. La supervisión proporciona ese tipo de informaciones, necesarias para las previsiones y predicciones meteorológicas cotidianas, estudios del cambio climático, la protección del medio ambiente, el desarrollo económico (transporte, energía, agricultura, construcciones, desarrollo urbano, servicios públicos, seguridad) y la seguridad de la vida y propiedades. Las observaciones de la Tierra también sirven para obtener datos pertinentes sobre los recursos naturales, especialmente beneficiosos para los países en desarrollo. Es importante no olvidar que esta información se obtiene a partir de mediciones obtenidas, reunidas, proporcionadas y distribuidas por sistemas de radiocomunicaciones.

Los sistemas radioeléctricos son esenciales para supervisar el clima y ayudar a los países a mitigar los efectos del cambio climático, adaptarse a él, y afrontar las grandes dificultades que supone. Todos los sistemas de radiocomunicaciones que utilizan el espectro radioeléctrico utilizan un recurso limitado y escaso. Disponer de bandas de frecuencias radioeléctricas exentas de interferencias perjudiciales es esencial para el desarrollo de todos los sistemas de observación de la Tierra.

Los sistemas utilizados para obtener y difundir esta información requieren un acceso fiable a frecuencias radioeléctricas que van desde unos pocos kHz a varios cientos de GHz y hacen uso de una gran variedad de tecnologías radioeléctricas, tales como radiocomunicaciones (por ejemplo, para radiosondas o satélites), radares meteorológicos (de precipitación y de perfil del viento, así como sensores activos utilizados en el espacio) y detección espacial, terrestre y basada en las radiocomunicaciones (por ejemplo, teledetección pasiva por satélite o detección del rayo).

Debe entenderse que estas aplicaciones de las radiofrecuencias están interrelacionadas y ayudan a componer un sistema meteorológico mundial y que la falta de alguno de estos componentes radioeléctricos del sistema, relativos a la observación o a la difusión de datos, puede poner en peligro todo el proceso meteorológico.

También es necesario destacar que los sistemas que utilizan estas frecuencias desempeñan un papel fundamental a la hora de detectar, avisar y prever catástrofes debidas a fenómenos meteorológicos, hidrológicos y climatológicos. Como esas catástrofes representan más del 90% de las catástrofes naturales, estos sistemas son componentes esenciales de los sistemas de emergencia, de alerta temprana en caso de catástrofes y de reducción de las consecuencias de las mismas.

El desarrollo de nuevas aplicaciones radioeléctricas dirigidas al mercado de masas y de valor añadido está suponiendo más presión sobre las bandas de frecuencias utilizadas para la meteorología, con el consiguiente riesgo potencial de limitar las aplicaciones meteorológicas en el futuro. Un riesgo especialmente importante es la teledetección pasiva por satélite que implica la medición de radiaciones naturales emitidas con muy bajo nivel en varias bandas de radiofrecuencias. Esas bandas son sensibles a más de una variable geofísica y, por consiguiente, deben utilizarse conjuntamente para obtener un cierto número de distintas cantidades. Las frecuencias radioeléctricas necesarias para ello vienen determinadas por la física fundamental y son inalterables. La continuidad de las observaciones en estas bandas también es esencial para supervisar y evaluar el cambio climático.

Los usuarios del espectro para fines meteorológicos deben permanecer vigilantes y plantear cada vez más temas relativos a la compartición del espectro con otros servicios de radiocomunicaciones. En reconocimiento a la importancia fundamental que tienen los servicios específicos de radiocomunicaciones para las actividades meteorológicas y medioambientales conexas necesarias para la seguridad de la vida y la propiedad, la protección del medio ambiente, los estudios sobre el cambio climático y la investigación científica, en su Resolución 29 (Cg-17) la Organización Meteorológica Mundial (OMM) pide a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y a sus Administraciones Miembros:

- que garanticen la disponibilidad y absoluta protección de las bandas de frecuencias radioeléctricas que, debido a sus características físicas especiales, son un recurso natural único para la teledetección pasiva por vehículos espaciales de la atmósfera y la superficie de la Tierra y son absolutamente esenciales para la investigación y las operaciones sobre el tiempo, el agua y el clima;
- que presten la debida consideración a las necesidades de la OMM en materia de asignaciones de frecuencias radioeléctricas y disposiciones reglamentarias para las operaciones e investigaciones meteorológicas y medioambientales conexas.

A este respecto, las últimas Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) han tomado varias decisiones importantes con respecto a la protección de las operaciones meteorológicas y medioambientales conexas. Así fue en particular en la CMR-15, que proporcionó espectro adicional para el futuro desarrollo de la teledetección espacial activa y enlaces de telemando de alta velocidad de datos para comunicar con satélites de exploración de la Tierra, así como para proteger bandas de observación pasivas que podrían verse impactadas por nuevas atribuciones. Habida cuenta de la creciente demanda de espectro que suponen los servicios comerciales, la CMR-19 y la CMR-23 serán muy importantes para la comunidad meteorológica, que debe proteger su espectro y el futuro desarrollo mundial de sistemas de observación modernos.

Con objeto de ofrecer una perspectiva de estos estudios, el Grupo de Trabajo 7C de Radiocomunicaciones «Sistemas de detección a distancia» de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones y el Grupo de Dirección de la OMM sobre coordinación de las frecuencias de radiocomunicaciones (SG-RFC) han elaborado el presente Manual revisado destinado a servir de guía a los usuarios profesionales que utilizan datos de los sistemas radioeléctricos de aplicación en meteorología, a las personas y a los gobiernos que utilizan dichos sistemas meteorológicos y a la comunidad de las radiocomunicaciones, incluidos los reguladores y la industria de las telecomunicaciones inalámbricas.

Este Manual proporciona una visión general sobre la utilización de los sistemas de radiocomunicaciones para supervisar las diversas manifestaciones del cambio climático y su influencia, así como la aplicación de las TIC y las radiocomunicaciones como una solución para contribuir a la reducción global del consumo energético.

El Manual presenta los sistemas meteorológicos y realiza una introducción y exposición de las características técnicas y operacionales de cada uno de estos sistemas. La descripción de los sistemas meteorológicos comprende: las bandas de RF utilizadas, los criterios de predicción de las interferencias perjudiciales provocadas por usuarios competidores y la repercusión de la degradación de los datos meteorológicos en detrimento de la seguridad de la población. Para facilitar la comprensión de estos temas tan complejos, se ha dividido la exposición por tipos de sistemas del siguiente modo:

- 1) Estructura general de los sistemas meteorológicos.
- 2) Sistemas del servicio de meteorología por satélite.
- 3) Sistemas del servicio de ayudas a la meteorología, fundamentalmente radiosondas.
- 4) Radares meteorológicos en tierra, incluidos los radares meteorológicos y los radares del perfil del viento.
- 5) Sistemas pasivos y activos de teledetección a bordo de vehículos espaciales para actividades meteorológicas.
- 6) Otros sistemas de radiocomunicaciones para actividades meteorológicas.

Como ayuda al lector, se adjunta un breve compendio de acrónimos y abreviaturas junto con una referencia a un conjunto más amplio de definiciones de terminología meteorológica.

## CAPÍTULO 1

**ESTRUCTURA GENERAL DE LOS SISTEMAS METEOROLÓGICOS**

	<i>Página</i>
1.1 Sistemas meteorológicos del Programa de Vigilancia Meteorológica Mundial .....	2
1.1.1 Sistema Mundial de Observación.....	3
1.1.1.1 Observación de la superficie .....	3
1.1.1.2 Observación de la atmósfera superior .....	4
1.1.1.3 Observaciones mediante radar .....	4
1.1.1.4 Estaciones de observación en el mar.....	4
1.1.1.5 Observación desde aviones .....	4
1.1.1.6 Observaciones desde satélites .....	4
1.2 Sistemas de observación de otros programas de la OMM .....	6
1.2.1 Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM .....	6
1.2.2 Sistema Mundial de Observación del Clima.....	7
1.2.3 Programa hidrológico y de recursos hídricos.....	7
1.3 Sistema Mundial de Observación Integrado de la OMM (SMOIO) .....	7

## 1.1 Sistemas meteorológicos del Programa de Vigilancia Meteorológica Mundial

Para analizar, prevenir y predecir el tiempo, la moderna meteorología depende del intercambio casi instantáneo de informaciones meteorológicas a lo largo de todo el mundo. El sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM), que es el núcleo de los programas de la OMM y combina los sistemas de observación, las instalaciones de telecomunicaciones y los centros de procesamiento de datos y de predicción, es explotado por los 191 Estados Miembros y territorios y pone a disposición la información meteorológica y geofísica conexas necesarias para proporcionar servicios eficaces en todos los países.

Este sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) está coordinado y supervisado por la OMM con objeto de garantizar que todos los países disponen de toda la información que necesitan para proporcionar cotidianamente los servicios de meteorología (análisis, alertas y predicciones), así como para la planificación a largo plazo y la investigación. Una parte cada vez más importante del Programa VMM ofrece soporte a programas internacionales relativos al clima mundial, especialmente el cambio climático así como otros temas medioambientales, y a un desarrollo sostenible.

El sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) consta de tres elementos integrados que componen el núcleo del sistema (véase la Figura 1-1):

- El **Sistema Mundial de Observación (SMO)** que proporciona observaciones normalizadas de gran calidad de la atmósfera y de la superficie del océano en cualquier parte del mundo y del espacio exterior. El SMO es una parte importante del Sistema Mundial de Observación Integrado de la OMM (SMOIO) que se describe brevemente a continuación.
- El **Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT)** que proporciona el intercambio en tiempo real de datos procedentes de las observaciones meteorológicas, productos procesados e información afín, entre los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales. El SMT es una parte importante del Sistema de Información de la OMM (WIS) y utiliza redes terrenales y espaciales especializadas, incluidas tecnologías de radiodifusión y videodifusión. El WIS también utiliza mucho Internet.
- El **Sistema Mundial de Procesamiento de Datos y Predicciones** que proporciona productos meteorológicos procesados (análisis, alertas y predicciones) generados por una red de centros meteorológicos mundiales y regionales especializados.

FIGURA 1-1

### Sistemas del programa de Vigilancia Meteorológica Mundial



### 1.1.1 Sistema Mundial de Observación

El Sistema Mundial de Observación (SMO) es la fuente primaria de información técnica de la atmósfera de todo el mundo y se trata de un sistema compuesto integrado por métodos, técnicas e instalaciones complejas para la medición de parámetros meteorológicos y medioambientales. El SMO garantiza la disponibilidad de información crítica para todos los países a fin de que puedan generar diariamente análisis, predicciones y alertas meteorológicas. Como muestra la Figura 1-2, el SMO comprende estaciones de observación situadas en tierra en el mar, en aeronaves y en satélites meteorológicos.

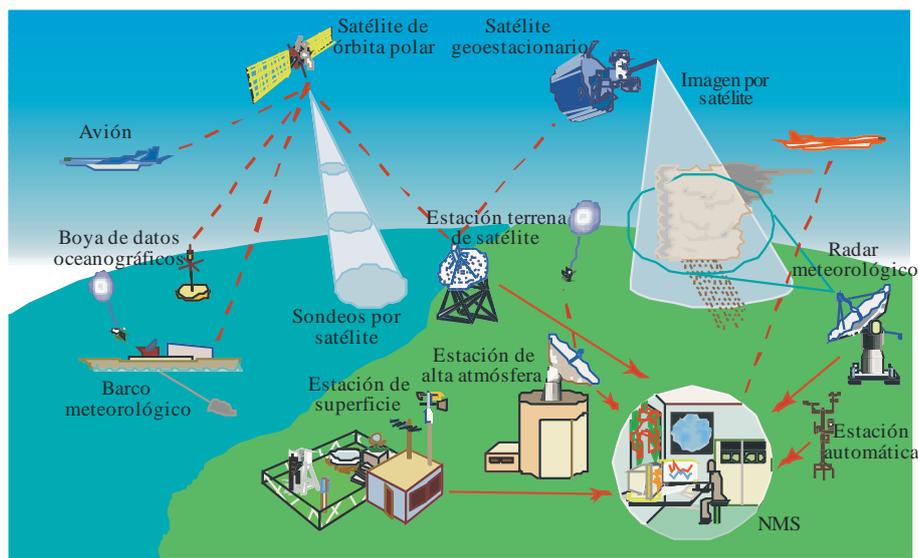
Las ventajas más evidentes del SMO son la protección de la vida y de los bienes gracias a la detección, predicción y alerta de fenómenos meteorológicos graves tales como tormentas locales, huracanes y ciclones extratropicales o tropicales. El SMO proporciona a la agrometeorología, a la meteorología aeronáutica y a la climatología, incluido el estudio del clima y el cambio global, datos procedentes de las observaciones. Los datos del SMO se utilizan también en apoyo de los programas de protección del medio ambiente en todo el mundo.

Hay una gran diversidad de actividades económicas, tales como la agricultura, el transporte, la construcción, los servicios meteorológicos públicos y el turismo que se benefician enormemente de las predicciones meteorológicas realizadas con una anticipación de días, semanas o incluso estaciones.

En la dirección <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php> figura información detallada sobre el SMO.

FIGURA 1-2

#### Sistema Mundial de Observación (SMO) de la OMM



#### 1.1.1.1 Observación de la superficie

El núcleo del sistema basado en la superficie sigue constando de aproximadamente 10 000 estaciones en tierra que realizan observaciones en la superficie de la Tierra o cerca de la misma. Las observaciones se refieren a parámetros meteorológicos tales como la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa cada hora, cada dos horas o cada tres horas. Los datos procedentes de estas estaciones se intercambian a nivel mundial en tiempo real. Un subconjunto de los datos observados en esas estaciones de superficie, la red de superficie del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), también se utiliza para supervisión del clima en el SMOC.

### 1.1.1.2 Observación de la atmósfera superior

Hay una red de 900 observatorios de atmósfera superior, aproximadamente, repartidos por todo el mundo, lo que representa unos 800 000 lanzamientos anuales, con radiosondas acopladas a globos de ascenso libre que miden la presión, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad desde el suelo hasta altitudes que alcanzan los 30 km. En las zonas oceánicas, las observaciones de las radiosondas se recogen en unos 20 barcos, que recorren principalmente el Atlántico Norte, equipados con instalaciones automáticas de sondeo de la atmósfera superior. Un subconjunto de los observatorios de la atmósfera superior, equipados especialmente para supervisar el clima, constituye la red de atmósfera superior del SMOC.

### 1.1.1.3 Observaciones mediante radar

Los radares meteorológicos y los de perfil del viento están demostrando ser de gran valor para la obtención de datos de alta resolución espacial y temporal, especialmente en las capas inferiores de la atmósfera. Los radares meteorológicos se utilizan por doquier como parte de las redes nacionales y, cada vez con más frecuencia, como parte de las regionales, principalmente para realizar predicciones a corto plazo de fenómenos atmosféricos de importancia. Los radares meteorológicos son especialmente útiles para efectuar estimaciones pluviométricas y, cuando tienen capacidad Doppler, para realizar mediciones del viento. Los radares de perfil del viento resultan especialmente útiles para realizar observaciones entre sondas transportadas por globos y tienen un gran futuro como componentes de las redes de observación integradas.

### 1.1.1.4 Estaciones de observación en el mar

En los océanos, el SMO se apoya en barcos, boyas ancladas y a la deriva y plataformas estacionarias. Las observaciones las realizan unos 7 000 barcos, aproximadamente, fletados al amparo del programa de barcos observadores voluntarios de la OMM, que recogen las mismas variables que las estaciones terrestres y además la temperatura del agua en la superficie y la altura y periodo de las olas, que son de gran importancia. El programa operacional de boyas a la deriva afecta a unas 900 unidades que entregan diariamente 12 000 informes de la temperatura del mar y de la presión del aire en la superficie.

Además, en los Océanos Pacífico e Índico se ha establecido el Sistema de Avisos de Maremotos, propiedad de los Estados Miembros y explotado por los mismos, bajo control de la Comisión Intergubernamental (COI) de la UNESCO en cooperación con la OMM, y está prevista su implantación en otras zonas marítimas. Este sistema incluye una red de sensores de superficie en tiempo real y de nivel de la profundidad del mar para la detección, alerta temprana y supervisión de maremotos.

### 1.1.1.5 Observación desde aviones

Hay más de 4 000 aviones que facilitan informes de presión, viento y temperatura durante el vuelo. El sistema de enlace de datos meteorológicos por avión (AMDAR, *aircraft meteorological data relay*) efectúa observaciones de gran calidad de los vientos y las temperaturas a altitud de crucero, así como a altitudes seleccionadas durante el ascenso y el descenso. El volumen de datos proporcionados por los aviones se ha multiplicado espectacularmente en los últimos años llegando a alcanzar unos 700 000 informes diarios, lo que corresponde a aproximadamente 90 000 perfiles de datos AMDAR en 550 aeropuertos del mundo. Estos sistemas ofrecen grandes posibilidades de efectuar mediciones en lugares donde los datos de las radiosondas son escasos o inexistentes y suponen una contribución de primer orden para el componente de atmósfera superior del SMO.

### 1.1.1.6 Observaciones desde satélites

El Sistema Mundial de Observación Medioambiental y Meteorológica por Satélite está integrado por constelaciones de satélites de observación geoestacionarios y no geoestacionarios (esencialmente en órbita polar y baja). En la Figura 1-3 figura una perspectiva general de los satélites meteorológicos actualmente operacionales (Situación: junio de 2016).

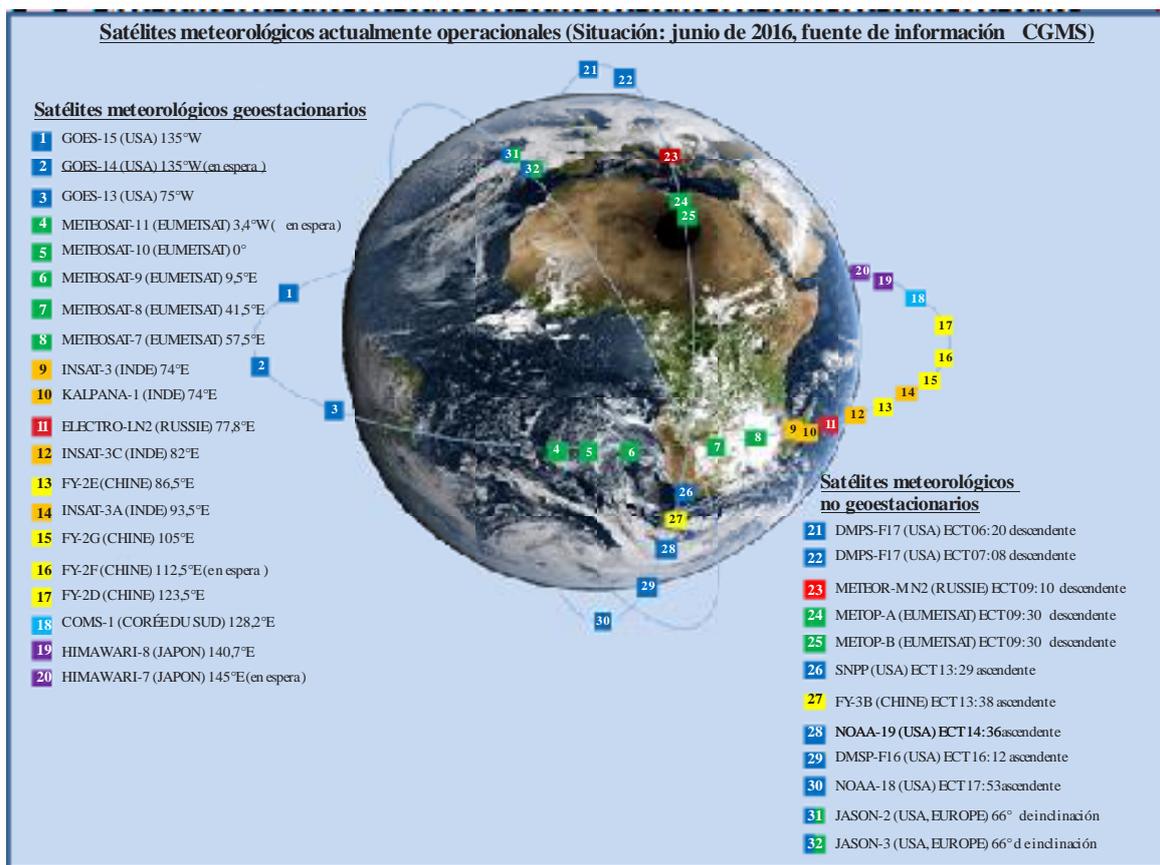
Los satélites en órbita polar y geoestacionarios están normalmente dotados de captadores de imágenes visibles e infrarrojas y sondas, que les permiten calcular muchos parámetros meteorológicos. Algunos de los satélites en órbita polar van equipados con instrumentos de sondeo por microondas capaces de proporcionar perfiles verticales de la temperatura y la humedad en todo el mundo. Los satélites geoestacionarios pueden utilizarse

para medir la velocidad del viento en los trópicos a partir del seguimiento de las nubes y del vapor de agua. Los sensores de los satélites, las comunicaciones y las técnicas de asimilación de datos evolucionan constantemente y la gran cantidad de datos adicionales proporcionados por los satélites ha contribuido enormemente a mejorar la observación y la predicción del clima y de los fenómenos meteorológicos así como la difusión de alertas.

Los avances de la modelización numérica, en particular, han permitido desarrollar métodos cada vez más complejos para calcular la información relativa a la temperatura y la humedad directamente a partir de las radiancias de los satélites. Los espectaculares progresos logrados en los últimos años en el análisis y previsión del clima y los fenómenos meteorológicos, incluidas las alertas de fenómenos meteorológicos peligrosos (lluvias torrenciales, tormentas, ciclones) que afectan a todas las poblaciones y economías, se deben en gran medida a las observaciones realizadas a bordo de vehículos espaciales y su asimilación en modelos numéricos.

FIGURA 1-3

**Constelación de los satélites meteorológicos actualmente operacionales del SMO de la OMM (Situación: junio de 2016)**



Meteo-01-03

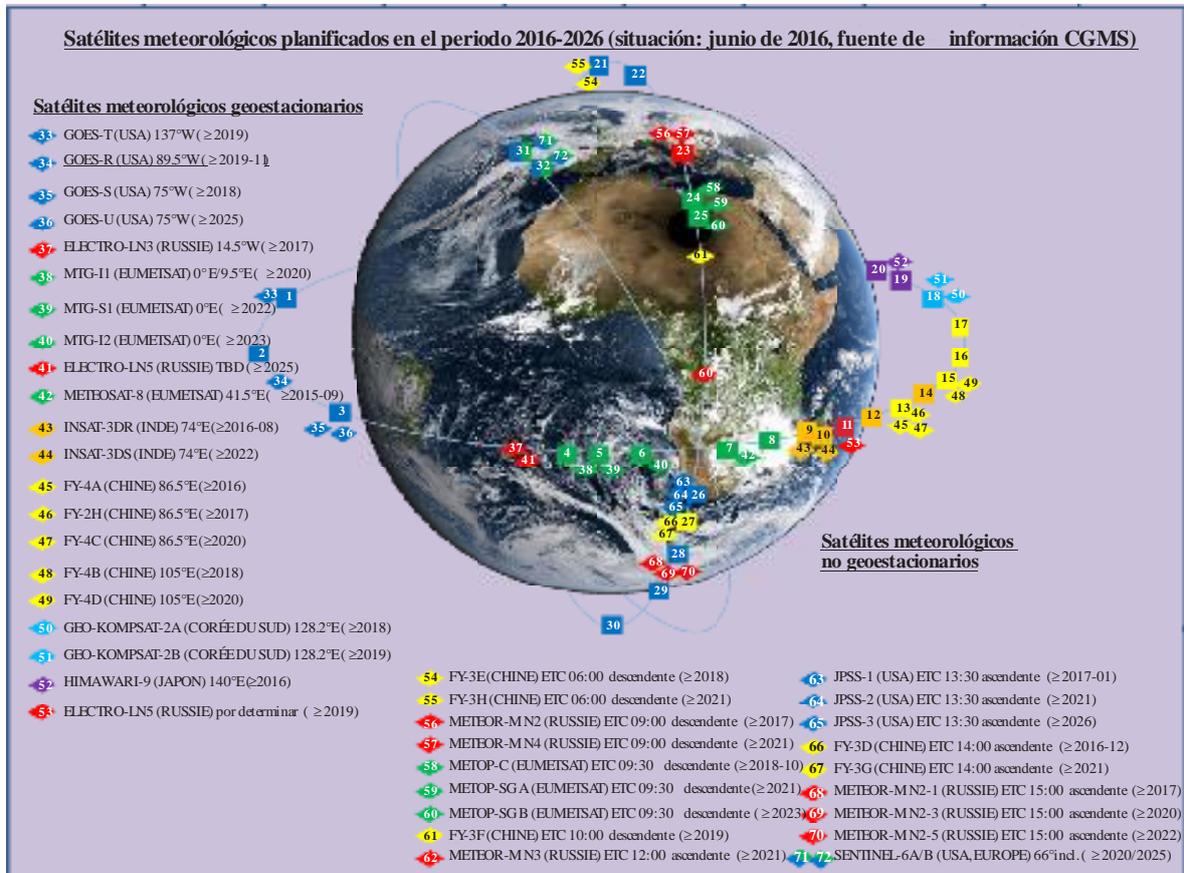
Véase una lista de los satélites meteorológicos actualmente operacionales y sus parámetros en <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php>.

A fin de obtener una continuidad operacional de las observaciones meteorológicas por satélite, los satélites actualmente operacionales serán sustituidos por nuevos satélites de las series existentes de la misma generación o primeros satélites de la siguiente generación, que disponen de instrumentos con capacidades de observación y una resolución superiores, lo que ofrece un volumen de datos notablemente mayor a la comunidad de usuarios meteorológicos.

La Figura 1-4 da una perspectiva general de los lanzamientos planificados de satélites meteorológicos que serán operacionales en el periodo 2016-2026, además de los satélites actualmente operacionales. Los nuevos satélites funcionarán en paralelo con satélites más antiguos hasta que éstos sean desactivados gradualmente cuando lleguen al final de su vida útil.

FIGURA 1-4

**Constelación de satélites meteorológicos planificados del SMO de la OMM que serán operacionales en el periodo 2016-2026 (situación: junio de 2016)**



Meteo-01-04

Además, varios satélites de Investigación y Desarrollo (I+D) incluyen igualmente una carga útil específica para meteorología o climatología que también contribuye al SMO. Véase una lista de actuales satélites de investigación y desarrollo y sus parámetros en <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSresearch.html>.

Los satélites de investigación y desarrollo incluyen la constelación más moderna en la componente espacial del SMO. Las misiones de I+D proporcionan datos válidos para uso operacional así como para muchos programas soportados por la OMM. Los instrumentos utilizados en estas misiones de I+D ofrecen datos que normalmente no se observan en los satélites meteorológicos operacionales o aportan mejoras a los actuales sistemas operacionales.

## 1.2 Sistemas de observación de otros programas de la OMM

### 1.2.1 Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM

El programa de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) integra varias actividades de supervisión e investigación de la OMM en el campo del medio ambiente atmosférico, entre ellas la red de control de la contaminación general atmosférica de la OMM y el sistema mundial de observación del ozono de la OMM.

Comprende más de 20 observatorios y más de 300 estaciones regionales. El principal objetivo del VAG es suministrar información sobre la composición química de la atmósfera y características físicas afines necesarias para mejorar la comprensión del comportamiento de la atmósfera y su interacción con los océanos y la biosfera. Otros sistemas de observación VAG proporcionan observaciones de la radiación solar, detectan rayos y miden la escala de las mareas. El VAG constituye la componente química atmosférica al Sistema Mundial de Observación del Clima.

### 1.2.2 Sistema Mundial de Observación del Clima

El Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC) tiene por objeto proporcionar observaciones con el nivel de detalle necesario para la supervisión del sistema climático, a fin de detectar y explicar el cambio climático, y de evaluar la repercusión de la variabilidad y del cambio del clima, y como apoyo a la investigación orientada a mejorar la comprensión, modelización y predicción del sistema climático especialmente el cambio climático. El SMOC contempla todo el sistema climático, incluidas las propiedades físicas, químicas y biológicas y los procesos atmosféricos, oceánicos, hidrológicos, criosféricos y terrestres.

### 1.2.3 Programa hidrológico y de recursos hídricos

Este programa se ocupa de la medición de los elementos hidrológicos básicos en las redes de estaciones hidrológicas y meteorológicas. Estas estaciones recogen, procesan, almacenan y utilizan datos hidrológicos, entre ellos los relativos a la cantidad y calidad de las aguas superficiales y de las subterráneas. El programa incluye el Sistema Mundial de Observación del Ciclo Hidrológico (WHYCOS, *World Hydrological Cycle Observing System*), que se apoya en una red mundial de estaciones de referencia y que transmite datos hidrológicos y meteorológicos prácticamente en tiempo real.

## 1.3 Sistema Mundial de Observación Integrado de la OMM (SMOIO)

Los Miembros de la OMM, en su Congreso de 2007, decidieron trabajar hacia la integración mejorada de los sistemas de observación de la OMM y de los sistemas de observación soportadas por la OMM tales como el Sistema Mundial de Observación de los Océanos (SMOO), el Sistema Mundial de Observación de la Tierra (SMOT) y el SMOC. El concepto del Sistema Mundial de Observación Integrado de la OMM (SMOIO) consiste en centrarse en las funciones operacionales y de gestión de todos los sistemas de observación de la OMM así como un mecanismo para establecer la interacción en los sistemas de observación copatrocinados por la OMM. Con la integración se obtendrá más eficacia y se ahorrarán costes. Los principales objetivos del SMOIO son los siguientes:

- Aumentar la interoperabilidad entre sistemas prestando especial atención a los componentes espaciales e *in situ* de los sistemas.
- Abordar las necesidades de los dominios atmosférico, hidrológico, oceanográfico, criosférico y terrenal en el ámbito operacional de un sistema integrado completo.
- Garantizar unos marcos de control más amplios y mejorar la gestión y gobernanza de la OMM.



## CAPÍTULO 2

**SERVICIO DE METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (MetSat)**

	<i>Página</i>
2.1 Definición del servicio de meteorología por satélite (MetSat) y sus atribuciones de frecuencia.....	10
2.1.1 Concepto general de los sistemas de satélites MetSat.....	11
2.2 Sistemas MetSat con satélites geoestacionarios (OSG).....	12
2.2.1 Transmisiones de datos brutos de los sensores de imágenes MetSat OSG.....	12
2.2.2 Difusión de datos del MetSat OSG.....	13
2.2.3 Plataformas de recogida de datos (PRD) del MetSat OSG.....	15
2.3 Sistemas MetSat con satélites no OSG.....	16
2.3.1 Transmisión de datos brutos tomados por un instrumento del MetSat no OSG.....	17
2.3.2 Difusión de los datos del MetSat no OSG.....	17
2.3.3 Sistema de recogida de datos (SRD) del MetSat no OSG.....	18
2.4 Mecanismos alternativos de difusión de datos.....	19

## 2.1 Definición del servicio de meteorología por satélite (MetSat) y sus atribuciones de frecuencia

El servicio de meteorología por satélite (MetSat) se define en el número 1.52 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) como un «Servicio de exploración de la Tierra por satélite con fines meteorológicos». Permite el empleo de enlaces de radiocomunicaciones entre estaciones terrenas y una o varias estaciones espaciales, que puede incluir enlaces entre estaciones espaciales a fin de suministrar:

- información sobre las características de la Tierra y sus fenómenos naturales, incluidos datos relativos al estado del medio ambiente, procedente de sensores activos y pasivos situados en satélites terrestres;
- información recogida de plataformas aéreas o terrenas;
- información distribuida a estaciones terrenas;
- enlaces de conexión necesarios para el funcionamiento de satélites MetSat y sus aplicaciones.

Este Capítulo trata de las aplicaciones del MetSat y comprende las siguientes transmisiones de radiocomunicaciones:

- transmisión de datos de observación de satélites MetSat a las principales estaciones receptoras;
- retransmisión de datos preprocesados a estaciones meteorológicas de usuario a través de satélites MetSat;
- transmisión por radiodifusión directa a las estaciones meteorológicas de usuario desde satélites MetSat;
- difusión de datos alternativa a los usuarios (GEONETCast) a través de otros sistemas de satélite que MetSat;
- transmisión de datos de plataformas de compilación de datos a satélites MetSat.

En el Cuadro 2-1 se indican las bandas de frecuencias atribuidas en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT al servicio de meteorología por satélite (MetSat) y al servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS). Los sistemas MetSat están autorizados a utilizar también las bandas de frecuencias atribuidas al SETS para transmisiones de datos (véase la Nota 1).

CUADRO 2-1

### Atribuciones de bandas de frecuencias al MetSat y al SETS en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT para uso por satélites meteorológicos para transmisiones de datos

Atribuciones disponibles para transmisiones de datos del MetSat	
Sentido espacio-Tierra	Sentido Tierra-espacio
137-138 MHz (MetSat primario)	401-403 MHz (SETS y MetSat primario)
400,15-401 MHz (MetSat primario)	2 025-2 110 MHz (SETS primario) (Nota 1) (y sentido espacio-espacio)
460-470 MHz (SETS y MetSat secundario <sup>1</sup> )	8 175-8 215 MHz (MetSat primario)
1 670-1 710 MHz (MetSat primario)	28,5-30,0 GHz (SETS secundario) (Nota 1)
2 200-2 290 MHz (SETS primario) (Nota 1) (y sentido espacio-espacio)	40,0-40,5 GHz (SETS secundario) (Nota 1)
7 450-7 550 MHz (MetSat primario, limitado a satélites geoestacionarios únicamente)	
7 750-7 900 MHz (MetSat primario, limitado a satélites no geoestacionarios únicamente)	
8 025-8 400 MHz (SETS primario) (Nota 1)	

<sup>1</sup> Según la nota 5.290 del RR, la atribución al servicio MetSat es a título primario en algunos países.

CUADRO 2-1 (fin)

Atribuciones disponibles para transmisiones de datos del MetSat	
Sentido espacio-Tierra	Sentido Tierra-espacio
18,0-18,3 GHz (MetSat primario para el sentido espacio-Tierra en la Región 2, limitado a satélites geoestacionarios únicamente)	
18,1-18,4 GHz (MetSat primario para el sentido espacio-Tierra en las Regiones 1 y 3, limitado a satélites geoestacionarios únicamente)	
25,5-27,0 GHz (SETS primario) (Nota 1) (y sentido espacio-espacio en 25,25-27,5 GHz)	
37,5-40,0 GHz (SETS secundario) (Nota 1)	
65,0-66,0 GHz (SETS primario) (Nota 1)	

NOTA 1 – Como el MetSat es una subcategoría del servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS), esas atribuciones (por ejemplo, las bandas 8 025-8 400 MHz y 25 500-27 000 MHz) también pueden utilizarse para el funcionamiento de satélites del MetSat y sus aplicaciones.

### 2.1.1 Concepto general de los sistemas de satélites MetSat

El sistema MetSat suele recoger diversos datos con sensores de imágenes visibles e infrarrojos así como con instrumentos de detección pasiva y activa utilizando también frecuencias de microondas atribuidas a tal fin (véase el Capítulo 5).

Los datos brutos recogidos por los instrumentos a bordo de satélites meteorológicos geoestacionarios son transmitidos constantemente a una estación en tierra primaria de la empresa de explotación, que los procesa y los distribuye a diversos centros meteorológicos nacionales, archivos oficiales y otros usuarios. Los datos brutos incluyen, por ejemplo, imágenes de la Tierra tomadas en varias longitudes de onda para obtener distintas mediciones. Los datos procesados se suelen devolver al satélite meteorológico para su retransmisión por radiodifusión directa a las estaciones de usuario mediante señales digitales de baja y/o alta velocidad de transmisión, o se distribuyen directamente a usuarios utilizando medios alternativos de difusión de datos.

A diferencia de los satélites MetSat geoestacionarios, que siempre están en línea de visibilidad directa de las estaciones en tierra, los instrumentos de los satélites meteorológicos no geoestacionarios deben reunir y almacenar a bordo los datos brutos adquiridos hasta poderlos transmitir a una estación en tierra primaria de la empresa de explotación cuando el satélite pasa por encima de la estación. Los datos brutos son entonces procesados por la empresa de explotación que los proporciona a los usuarios mediante diversos mecanismos de difusión de datos. A fin de mejorar la latencia de los datos, un subconjunto de los datos adquiridos por los instrumentos es «transmitido» directamente desde el satélite y puede ser recibido por estaciones de usuario cuando el satélite se encuentra en línea de visibilidad directa de esas estaciones, que puede estar ubicada en cualquier sitio. Ese servicio se llama «lectura directa».

Los satélites meteorológicos geoestacionarios y no geoestacionarios también incorporan sistemas de recogida de datos (SRD), a saber plataformas de recogida de datos (PRD) en satélites geoestacionarios (OSG) y sistemas tales como Argos en satélites no geoestacionarios (no OSG).

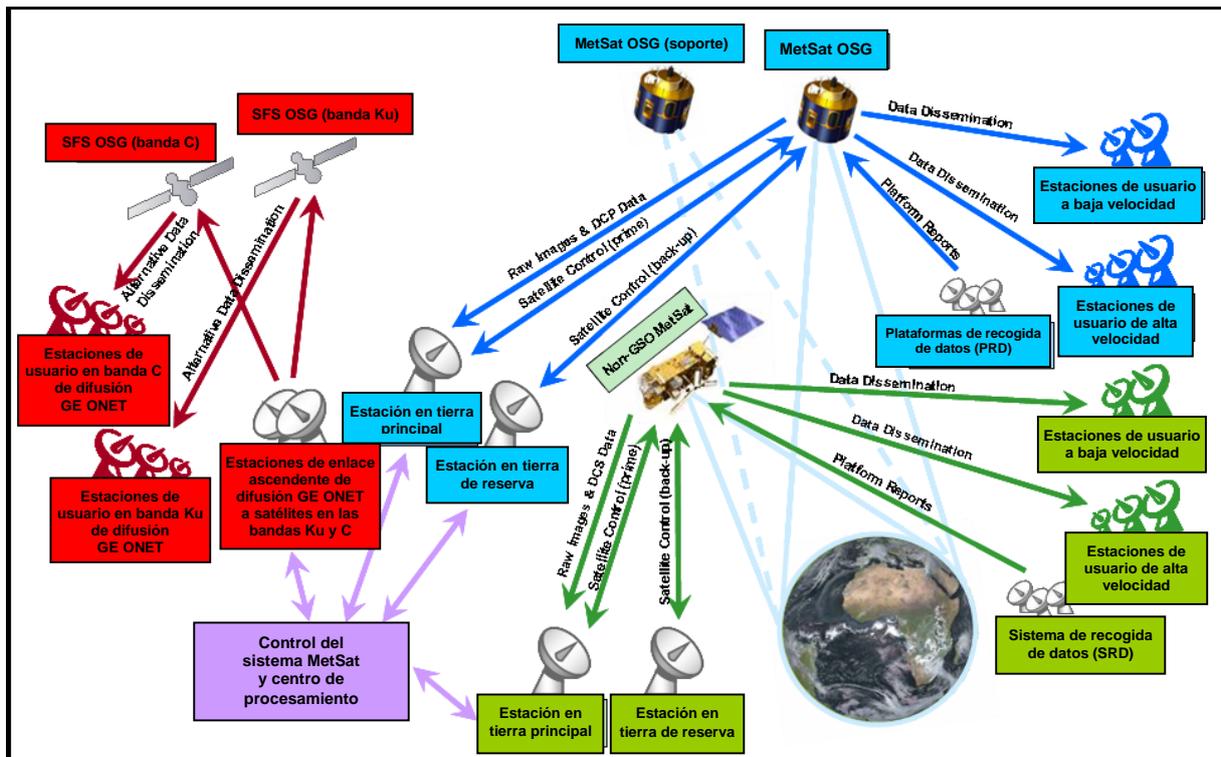
Las PRD, normalmente situadas en tierra, aeronaves, barcos y boyas flotantes, transmiten a satélites meteorológicos geoestacionarios. Los datos recogidos por esas PRD son de parámetros tales como temperatura de la superficie, velocidad del viento, intensidad de lluvia, altitud de la corriente, gases en la atmósfera y, en el caso de las boyas flotantes, contaminantes del mar. También pueden transmitir su posición actual, permitiendo la determinación del movimiento. Además del funcionamiento de los canales PRD regionales, los operadores MetSat también contribuyen al sistema internacional de recogida de datos (SIRD) mediante la explotación de canales internacionales. Como una futura aplicación adicional, también puede atribuirse un número especializado de canales SIRD para su utilización como sistema de supervisión en caso de emergencia/catástrofe.

Las plataformas de recogida de datos tales como el sistemas Argos, transmiten a satélites MetSat no OSG. Cuando están instalados en boyas y flotadores, estas plataformas miden la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, las corrientes de la superficie marina y otros parámetros del mar. Entre otras aplicaciones, los sistemas PRD en satélites no OSG también se utilizan para realizar un seguimiento del desplazamiento de los animales así como para supervisar la flota pesquera.

La Figura 2-1 muestra la arquitectura general de un sistema MetSat.

FIGURA 2-1

Arquitectura general de un sistema MetSat



Meteo-02-01

## 2.2 Sistemas MetSat con satélites geostacionarios (OSG)

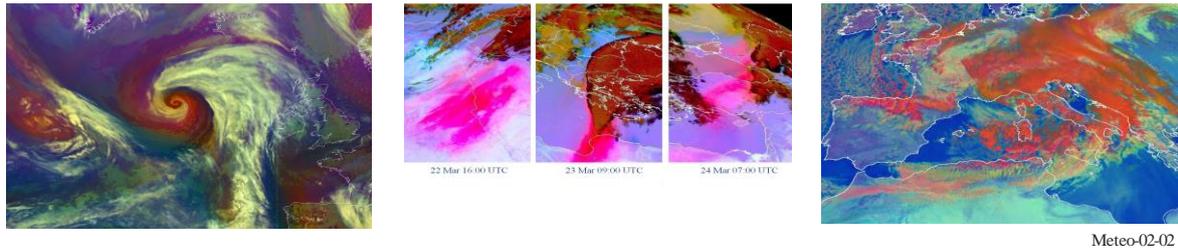
En el marco del Sistema Mundial de Observación que pertenece al Sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial, actualmente funciona un cierto número de satélites meteorológicos para garantizar observaciones con cobertura completa de la Tierra desde la órbita de los satélites meteorológicos (véase la Figura 1-3). Se asegura la cobertura mundial continua y a largo plazo de observaciones desde la órbita de los satélites geostacionarios programando futuros lanzamientos de satélites meteorológicos (véase la Figura 1-4), sustituyendo los actuales o complementando los sistemas de satélites existentes.

### 2.2.1 Transmisiones de datos brutos de los sensores de imágenes MetSat OSG

Los datos obtenidos por los sensores de imágenes visibles, casi infrarrojas e infrarrojas y otros sensores a bordo de satélites meteorológicos OSG se transmiten a las principales estaciones de operación (denominadas a menudo estaciones de telemando y adquisición de datos o estaciones TAD) en la banda 1 670-1 690 MHz.

La Figura 2-2 proporciona ejemplo de imágenes de datos procesados procedentes de un instrumento sensor de imágenes a bordo de un satélite meteorológico OSG.

FIGURA 2-2

**Imagen de datos procesados procedentes de un satélite meteorológico OSG**

Tormenta ciclónica sobre el Atlántico Norte (Meteosat-9 Airmass RGB, 19/05/08 12:00 UTC)

Inicio de una tormenta de polvo de gran intensidad procedente del Norte de África y que se dirige hacia Grecia, Turquía, Rusia y Kazajistán (Meteosat-9, Dust RGB, 22/03/08 – 24/03/08)

Viento mistral intenso y ciclón sobre el Golfo de Génova con fuerte precipitación en el sur de los Alpes (Meteosat-8 RGB: VIS0.8, IR3.9r, IR10.8, 20/03/07 09:00 UTC)

Existe sólo un número limitado de estaciones de este tipo en el mundo, en entre uno y tres emplazamientos por sistema de satélites, con una antena por cada satélite de la flota operacional, que suma hasta 50 ó 60 estaciones en tierra primarias explotadas por las empresas de explotación MetSat OSG. Están equipadas con antenas de aproximadamente 10 m a 18 m de diámetro y suelen funcionar con un ángulo de elevación mínimo de 3°. El factor de calidad ( $G/T$ ) de estas estaciones es del orden de 23 dB/K. Las anchuras de banda de transmisión típicas de la actual generación de las redes MetSat OSG se encuentran entre 2 MHz y 20 MHz dependiendo de las características del instrumento y de los métodos de modulación empleados.

En este contexto cabe señalar que en los sistemas MetSat cuyas asignaciones se han notificado después del 1 enero de 2004, la banda 1 670-1 675 MHz no estará protegida contra la interferencia perjudicial procedente de aplicaciones del servicio móvil por satélite (SMS) y, por consiguiente, ya no es utilizable por los nuevos sistemas MetSat.

Para la próxima generación de sistemas MetSat OSG que se están desarrollando actualmente y estarán operativos en el periodo 2016-2026, como se indica en la Figura 1-4, las velocidades de datos y los correspondientes requisitos de anchura de banda para el enlace descendente de los datos de esos sistemas MetSat OSG aumentarán significativamente (hasta 800 Mbit/s). En consecuencia, será necesario utilizar frecuencias más elevadas que la banda 1 670-1 698 MHz, tales como las de las bandas 7 450-7 550 MHz (transmisión de datos brutos en las series Electro-L y FY-4), 8 025-8 400 MHz (GOES-R), 18,0-18,3 GHz (Región 2), 18,1-18,4 GHz (Regiones 1 y 3) (satélites Himawari y FY-4) y en particular la banda 25,5-27 GHz (Adquisición principal de datos (MDA, *Main Data Acquisition*)) en la serie Meteosat de tercera generación (MTG, *Meteosat Third Generation*).

### 2.2.2 Difusión de datos del MetSat OSG

Los siguientes §§ 2.2.2.1 a 2.2.2.6 describen las funciones de difusión directa de los sistemas MetSat OSG que funcionan en el marco del Sistema Mundial de Observación perteneciente al Sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial.

#### 2.2.2.1 Radiómetro ampliado de barrido rotatorio en el espectro visible y el infrarrojo (S-VISSR)

El servicio S-VISSR funciona con la serie de satélites del sistema MetSat OSG de China Feng-Yun-2 (FY-2).

Los datos observados mediante sensores VISSR se transmiten a las estaciones principales de operaciones en tierra de este sistema MetSat OSG chino. En tierra, los datos se preprocesan prácticamente en tiempo real y se retransmiten por el mismo satélite a una velocidad de datos inferior (ampliada). Estos datos se reciben en las estaciones terrenas S-VISSR, también denominadas estaciones de utilización de datos de media escala (MDUS, *medium-scale data utilization stations*). Se conoce más de un centenar de estaciones receptoras de este tipo en funcionamiento. Los principales usuarios son los servicios meteorológicos y las universidades.

Las transmisiones S-VISSR se efectúan en la subbanda 1 683-1 690 MHz con una frecuencia central en 1 687,5 MHz. La velocidad de datos de transmisión es de 660 kbit/s en una anchura de banda típica de 2 MHz. El factor de calidad de las estaciones receptoras es de 12 dB/K y sus antenas tienen un diámetro de alrededor de 3 m y un ángulo de elevación mínimo de 5 grados.

### 2.2.2.2 Variables de los satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES) (GVAR)

Los satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES-13, 14, y 15, *geostationary operational environmental satellites*), propiedad de Estados Unidos de América, transmiten datos de medición procesados denominados GVAR a un mínimo de varios centenares de estaciones receptoras que se encuentran en el interior de la traza del satélite GOES situado en 75° W y 135° W. Entre éstas, además de las estaciones situadas en América del Norte y América del Sur, hay otras situadas en Nueva Zelanda, Francia, España y Gran Bretaña. La mayor parte de los destinatarios son universidades y agencias estatales dedicadas a la investigación y predicción meteorológicas. Hay además proveedores de valor añadido que suministran predicciones meteorológicas a empresas comerciales. El flujo de datos, transmitido a 1 685,7 MHz con una anchura de banda de 5 MHz, aproximadamente, consiste principalmente en imágenes y datos de la sonda con información suplementaria de calibración y navegación, así como telemetría, mensajes de texto y diversos productos auxiliares.

Con la nueva generación de satélites GOES, empezando por GOES-R, el servicio GOES ReBroadcast (GRB) en 1 686,6 MHz sustituye al servicio GOES Variable (GVAR) existente y necesita una mayor anchura de banda para dar cabida a velocidades de datos muy superiores, del orden de 30 Mbit/s, a diferencia de GVAR que tiene una velocidad de 2 Mbit/s. El GVAR funciona actualmente en 1 685,7 MHz y necesita 4,22 MHz de anchura de banda, mientras que GRB necesitará 9,7 ó 10,9 MHz para transmitir los datos procesados y funcionará en 1 686,6 MHz.

### 2.2.2.3 Facsímil meteorológico (WEFAX)

El servicio de facsímil meteorológico (WEFAX) analógico restante, que aún es operacional en algunos satélites MetSat OSG, está siendo sustituido por el servicio de transmisión digital de información a baja velocidad (LRIT) en los sistemas de satélites meteorológicos de segunda generación. El servicio WEFAX consiste en transmisiones analógicas dirigidas a estaciones meteorológicas de usuario de bajo coste situadas en la zona de recepción de los satélites meteorológicos. Los parámetros del servicio WEFAX se definieron y fueron acordados en el Grupo de Coordinación sobre Satélites Meteorológicos (CGMS, *Co-ordination Group for Meteorological Satellites*), que es un foro para el intercambio de información técnica sobre sistemas de satélites meteorológicos geoestacionarios y en órbita polar.

El servicio de facsímil meteorológico (WEFAX) en GOES-13, 14, y 15 a 1 691 MHz (586 kHz) se combinará con la transmisión digital de información a baja velocidad (LRIT) y la *Emergency Managers Weather Information Network* (EMWIN), que funcionan actualmente a 1 692,7 MHz (27 kHz) en un solo enlace descendente llamado HRIT/EMWIN en el cual el HRIT sustituye al LRIT. El nuevo servicio combinado transmitirá a 1 694,1 MHz y necesitará 1,21 MHz de anchura de banda. El enlace descendente existente de datos de sensores a 1 676 MHz será desplazado a 8 220 MHz en la banda X del SETS (8 025-8 400 MHz) para dar cabida a las velocidades de datos muy superiores de los sensores avanzados a bordo del vehículo espacial GOES-R.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha registrado varios miles de estaciones receptoras WEFAX de todo el mundo, no obstante al igual que en el caso de los receptores GVAR y S-VISSR, no se conoce exactamente el número real de receptores en funcionamiento. Las estaciones receptoras WEFAX son equipos indispensables para el funcionamiento de los servicios meteorológicos más pequeños y de tamaño medio y se utilizan asimismo en las universidades, agencias medioambientales, agencias de prensa, colegios, etc.

La transmisión de los servicios WEFAX se realiza en la subbanda 1. Los servicios WEFAX restantes tienen como frecuencia central 1 691 MHz y una anchura de banda de entre 0,03 MHz y 0,26 MHz. Las estaciones receptoras WEFAX típicas funcionan con ángulos de elevación superiores a 3 grados y utilizan antenas de 1,2 m de diámetro con un factor de calidad ( $G/T$ ) de 2,5 dB/K. El contenido de las transmisiones WEFAX

consiste en sectores de imágenes de satélites, representación gráfica de productos meteorológicos, imágenes de prueba y mensajes administrativos con información alfanumérica en forma de representación gráfica.

#### 2.2.2.4 Transmisión de información a baja velocidad (LRIT)

LRIT es un servicio que se inició en 2003 sobre los satélites meteorológicos geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES) para la transmisión con destino a estaciones de usuario de bajo coste. Se pretendía que este servicio sustituyese al servicio WEFAX en otros satélites geoestacionarios del MetSat, dando servicio a una comunidad de usuarios semejante.

Las LRIT se efectúan en la subbanda de 1 690-1 698 MHz con frecuencias centrales en torno a 1 691 MHz. La anchura de banda es de hasta 660 kHz. Las antenas de las estaciones de usuario tienen diámetros comprendidos entre 1,0 m y 1,8 m y funcionan con un ángulo de elevación mínimo de 3°. El factor de calidad de las LRUS es 3-6 dB/K dependiendo de la ubicación de la estación de usuario. El LRIT es operacional en muchos sistemas MetSat, a saber los satélites GOES, los satélites Meteosat de la segunda generación, el satélite COMS-1 (que será continuado por el satélite GEO-KOMPSAT-2A), los satélites Himawari, los satélites Electro-L y la serie de satélites FY-2 a partir del satélite FY-2E/F/G y será continuado en la serie FY-4 junto con una emisión de información de alarma meteorológica de emergencia (EWAIB, *Emergency Weather Alarm Information Broadcast*).

#### 2.2.2.5 Transmisión de información a alta velocidad (HRIT)

El servicio HRIT comenzó en enero de 2004 con la puesta en servicio del primer satélite perteneciente a la serie de satélites de segunda generación Meteosat (Meteosat-8) y es operacional en muchos sistemas del MetSat, a saber los satélites Himawari, el satélite COMS-1 (que será continuado por el satélite GEO-KOMPSAT-2A), los satélites Electro-L y los futuros satélites de la serie FY-4. Por otra parte, los satélites de la serie GOES a partir de GOES-R operarán un servicio HRIT/EMWIN.

El servicio HRIT funciona en las subbandas 1 675-1 687 MHz, 1 684-1 690 MHz o 1 690-1 698 MHz. El tamaño de antena para las estaciones de usuario de alta velocidad (HRUS) y las MDUS es de 4 m o inferior y el ángulo de elevación mínimo es de 3 grados. El factor de calidad para las estaciones de usuario es 12-14 dB/K dependiendo de la ubicación de la estación de usuario.

El CGMS publicó en 2013 una nueva especificación mundial de radiodifusión directa (GEO HRIT/LRIT). Esta especificación de radiodifusión directa es aplicable a sistemas GEO existentes y planificados, aunque no se especifican características de estación de usuario. El CGMS sigue trabajando para evaluar la necesidad de seguir poniendo al día la especificación global de GEO habida cuenta de que hay normas nuevamente disponibles y utilizadas en telecomunicaciones y formatos de ficheros.

#### 2.2.3 Plataformas de recogida de datos (PRD) del MetSat OSG

Los sistemas de recogida de datos funcionan en los satélites meteorológicos para la recopilación de datos meteorológicos y de otros datos medioambientales desde PRD remotas. Las transmisiones desde cada PRD dirigidas a un satélite meteorológico se realizan en la banda de frecuencias 401-403 MHz. Las PRD funcionan en modo temporal secuencial. Los intervalos temporales de transmisión son normalmente de 1 min. La velocidad de transmisión es de 100 bit/s. Las PRD de transmisión de datos más elevadas (300 bit/s y 1 200 bit/s) empezaron a funcionar en 2003 y cabe esperar que su número aumente rápidamente en un próximo futuro. Las anchuras de banda de canal de estas PRD de velocidades de transmisión de datos elevadas son 0,7510 kHz o 2,2510 kHz para las velocidades de 300 y 1 200 bit/s, respectivamente.

Hay varios tipos de transmisores PRD funcionando normalmente con potencias de salida de 5 W, 10 W y 20 W con una antena directiva, o una potencia de salida de 40 W con una antena omnidireccional. La potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) resultante en el enlace ascendente se encuentra entre 40 y 52 dBm. Los sistemas de recogida de datos funcionan actualmente en varios sistemas de satélites meteorológicos geoestacionarios.

Las PRD que informan a MetSat geoestacionarios utilizan frecuencias en la gama 401,1-402,85 MHz, destinándose la banda 402,001-402,067 MHz a la actividad internacional (22 canales de 3 kHz de anchura de banda). Utilizando bandas estrechas (de tan sólo 0,75 kHz) y acortando los periodos de comunicación de

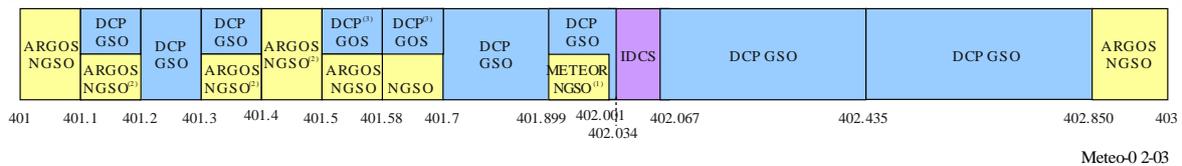
informes a unos 10 s, es posible recibir datos de un gran número de esas plataformas. Por ejemplo, en el caso de los GOES-13, 14 y 15, en 2016 hubo en torno a unas 27 000 PRD de alta velocidad de GOES que enviaron hasta 400 000 mensajes por día, entregando cada día más de 6 millones de observaciones al GOS, y es de esperar que estas cifras sigan aumentando.

**2.2.3.1 Condiciones básicas de partición y compartición generales de la banda 401-403 MHz**

Las mayores necesidades de espectro para los sistemas del SETS y del MetSat con satélites geoestacionarios y no geoestacionarios exigirán a todos los operadores que respeten la partición general básica de la banda 401-403 MHz para los actuales y futuros DCS (véase la Figura 2-3), acompañada de condiciones de compartición, como se indica en la Recomendación UIT-R SA.2045.

FIGURA 2-3

**Partición general básica de la banda 401-403 MHz para la futura utilización coordinada a largo plazo de sistemas SRD del MetSat y del SETS con satélites geoestacionarios y no geoestacionarios**



**2.3 Sistemas MetSat con satélites no OSG**

Además de los numerosos satélites MetSat OSG, los sistemas MetSat no OSG complementan la contribución de los satélites al Sistema Mundial de Observación mediante los datos de medición de cobertura mundial procedente de una gran variedad de sensores pasivos y activos que realizan observaciones en las regiones espectrales visible, infrarroja y de microondas.

La cobertura continua y a largo plazo de las observaciones desde satélites no geoestacionarios se garantizará mediante el funcionamiento de los actuales y futuros satélites explotados por un cierto número de organizaciones meteorológicas nacionales y regionales de todo el mundo (véanse las Figuras 1-3 y 1-4).

La Figura 2-4 proporciona ejemplos de un radiómetro avanzado de resolución muy elevada a bordo de sistemas MetSat no OSG operacionales que toman imágenes de nubes, océanos y superficies terrestres en los espectros visible, casi infrarrojo e infrarrojo. En el Capítulo 5 aparecen ejemplos de sensores pasivos y activos que realizan observaciones en la región espectral de microondas y funcionan en los sistemas MetSat no OSG.

FIGURA 2-4

**Muestras de imágenes tomadas por un radiómetro avanzado de resolución muy elevada**



### 2.3.1 Transmisión de datos brutos tomados por un instrumento del MetSat no OSG

Los datos brutos tomados por los satélites meteorológicos no geostacionarios actualmente operacionales, la mayoría en órbita polar se transmiten en la banda de frecuencias 7 750-7 900 MHz o 8 025-8 400 MHz, dependiendo de la anchura de banda que se necesite, a estaciones principales situadas en latitudes elevadas. La transmisión tienen lugar en ráfagas en el momento en que cada satélite sobrevuela su estación principal, desconectándose los transmisores el tiempo restante.

#### 2.3.1.1 Transmisión de datos brutos tomados por un instrumento del MetSat no OSG en la banda 25,5-27 GHz

Algunos futuros sistemas del MetSat no OSG (por ejemplo el sistema polar EUMETSAT – segunda generación (EPS-SG) con sus satélites Metop-SG y los satélites del sistema de satélites polar conjunto (JPSS)) necesitarán utilizar bandas de frecuencias aún más altas que las utilizadas por los satélites actualmente operacionales, es decir, la banda 25,5-27 GHz, para poder transmitir las velocidades de datos significativamente superiores de hasta 800 Mbit/s a sus estaciones principales en tierra. Ese enlace se llama enlace descendente de datos de misión almacenados (SMD, *Stored Mission Data*). Otros utilizarán la banda de frecuencias 8 025-8 400 MHz (es decir los actuales FY-3, METEOR y Suomi-NPP).

### 2.3.2 Difusión de los datos del MetSat no OSG

En los §§ 2.3.2.1 a 2.3.2.4 siguientes se describen las funciones de difusión directa de los sistemas MetSat no OSG explotados en el marco del Sistema Mundial de Observación perteneciente al Sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial.

#### 2.3.2.1 Difusión de datos del MetSat no OSG en la banda 1 698–1 710 MHz

##### 2.3.2.1.1 Transmisión automática de imágenes (APT)

El servicio de transmisión automática de imágenes (APT, *automatic picture transmission*) se introdujo en algunos vehículos espaciales en los años 60 llegando a ser el sistema de más éxito de difusión directa de datos a los usuarios de la comunidad meteorológica. Miles de esas estaciones receptoras APT aún siguen funcionando en todo el mundo. Estas estaciones APT son muy económicas y las explotan servicios meteorológicos y universidades, pero también una gran comunidad de usuarios ajenos a la meteorología.

Las estaciones APT suelen estar normalmente dotadas de antenas omnidireccionales y de receptores de ondas métricas adquiribles en el mercado (COTS, *commercial-off-the-shelf*). A este frontal se incorporan sistemas de procesamiento de imagen de bajo coste con programas informáticos económicos ejecutados en ordenadores de sobremesa comunes. El APT es operacional en los satélites NOAA y la serie de satélites METEOR-M N2.

##### 2.3.2.1.2 Transmisión de imágenes de baja resolución (LRPT)

El servicio de transmisión de imágenes de baja resolución (LRPT, *low resolution picture transmission*) sustituirá en principio a la aplicación APT en la mayoría de los sistemas MetSat no OSG. No obstante, la única serie de satélites en la que el servicio LRPT está implementado y es operacional es METEOR-M N2. El servicio LRPT se basa en esquemas de transmisión digital y hace uso de las mismas bandas de frecuencias que las actualmente utilizadas por la APT. La anchura de banda también puede llegar hasta 175 kHz.

##### 2.3.2.1.3 Transmisión de imágenes de alta resolución (HRPT)

El servicio de transmisión de imágenes de alta resolución (HRPT, *high resolution picture transmission*) proporciona imágenes de alta resolución para la comunidad meteorológica. Los transmisores HRPT están activados continuamente y sus emisiones puede recibirlas cualquier estación de usuario. Hay cientos de estaciones receptoras HRPT en todo el mundo registradas en la OMM. Sin embargo, cabe señalar que este número no es totalmente fiable puesto que el registro de estas estaciones no tiene carácter obligatorio. Los datos HRPT son indispensables para el funcionamiento de los servicios meteorológicos y son asimismo de gran utilidad en otros cometidos.

En el servicio HRPT, como en los satélites NOAA (1 698/1 702,5/1 707 MHz), las transmisiones se efectúan en la banda de frecuencias 1 698-1 710 MHz con anchuras de banda de la señal comprendidas entre 2,7 MHz y 4,5 MHz. Las estaciones de usuario van equipadas con antenas parabólicas de seguimiento que suelen tener entre 2,4 y 3 m de diámetro. El ángulo de elevación mínimo recomendado para la recepción es de 5 grados, aunque algunas estaciones funcionan con ángulos de elevación inferiores al indicado. El factor de calidad de las estaciones es de 5 dB/K. Existen otros sistemas HRPT funcionando con velocidades de transmisión de datos que son aproximadamente el doble de la velocidad de los sistemas HRPT originales.

También existe una aplicación HRPT avanzada (AHRPT) en algunos de los satélites meteorológicos operacionales más recientes, es decir las series de satélites METEOR-M N2 (1 700/1 705 MHz), Metop (1 701,3/1 707 MHz) y FY-3 (1 701,3 MHz, 1 704,5 MHz o 1 706,7MHz), destinada a sustituir al servicio HRPT.

Las transmisiones AHRPT utilizan la misma banda que los otros sistemas HRPT. La anchura de banda está comprendida entre 4,5 y 6,8 MHz. Las estaciones de recepción AHRPT reciben con ángulos de elevación mínimos de 5 grados. Las antenas son parabólicas con diámetros típicos comprendidos entre 2,4 m y 3 m. El *G/T* de las estaciones AHRPT es de unos 6,5 dB/K.

El Grupo de Coordinación sobre Satélites Meteorológicos (CGMS) publicó en 2014 una nueva especificación mundial de radiodifusión directa (*Direct Broadcast Global Specification* (Lectura directa LEO (HRPT/AHRPT))). Esta especificación de radiodifusión directa es aplicable a sistemas LEO existentes y planificados, aunque no se especifican características de estación de usuario. El CGMS sigue trabajando para evaluar la necesidad de seguir poniendo al día la especificación global de LEO habida cuenta de que hay normas nuevamente disponibles y utilizadas en telecomunicaciones y formatos de ficheros.

### 2.3.2.2 Difusión de datos del MetSat no OSG en la banda 7 750-7 900 MHz

La tendencia a utilizar más datos de mayor resolución también obliga a utilizar bandas de frecuencias más altas para la difusión directa de datos de instrumentos a estaciones de usuario, ya que las correspondientes necesidades de anchura de banda para esos datos de alta resolución no se pueden satisfacer en la banda 1 698-1 710 MHz. Por consiguiente, la banda de frecuencias siguiente más alta disponible atribuida al MetSat en el sentido espacio-Tierra que se debe utilizar es la de 7 750-7 900 MHz, ya que en ella se pueden atender las necesidades de anchura de banda de los sistemas del MetSat no OSG de la nueva generación, que van de 30 a 150 MHz para los distintos enlaces descendentes (MPT (FY-3), datos de alta resolución (HRD, *High Resolution Data*) (Suomi-NPP y JPSS) y radiodifusión directa de datos (DDB, *Direct Data Broadcast*) (Metop-SG)).

La transmisión de imágenes de resolución media (MPT, *Medium-resolution Picture Transmission*) proporciona un conjunto completo de datos de mediciones de instrumentos MERSI a bordo de los satélites de la serie FY-3. La velocidad actual de transmisión de datos de los satélites FY-3 es de 18,7 Mbit/s con una anchura de banda de 45 MHz centrada en 7 775 MHz, o de 45 Mbit/s con una anchura de banda de 60 MHz centrada en 7 780 ó 7 820 MHz. Además, en la serie FY-3 se proporciona un servicio de transmisión aplazada de imágenes (DPT, *Delayed Picture Transmission*) para transmisión ficticia de datos a 8 145,95 MHz con una anchura de banda de 149 MHz a una velocidad de datos de 93 Mbit/s, o a 8 175 MHz y 8 125 MHz con una anchura de banda de 300 MHz a una velocidad de datos de 225 Mbit/s. Los datos de alta velocidad (HRD, *High Rate Data*) son la transmisión de un conjunto de datos a plena resolución de Suomi-NPP y la serie de satélites JPSS con velocidades de datos de hasta 15 Mbit/s (anchura de banda de 30 MHz) con su frecuencia central en 7 812 MHz. La radiodifusión directa de datos (DDB, *Direct Data Broadcast*) en la serie de satélites Metop de la segunda generación (Metop-SG) transmitirá a 7 825 MHz con una anchura de banda de 150 MHz.

### 2.3.3 Sistema de recogida de datos (SRD) del MetSat no OSG

Los sistemas de recogida de datos en satélites del MetSat no OSG proporcionan una gran variedad de información utilizada principalmente por organismos públicos, pero también por entidades comerciales.

Estos datos incluyen varios parámetros medioambientales sobre océanos, ríos, lagos, tierra firme y atmósfera relativos a procesos físicos, químicos y biológicos. También incluye datos sobre el seguimiento de los movimientos de animales. Ahora bien, la utilización por entidades comerciales es limitada y consiste, por ejemplo, en la supervisión de las condiciones de oleoductos a fin de proteger el medio ambiente o la seguridad

marítima. Algunos transmisores también se instalan para comunicar emergencias y suministrar datos relativos por ejemplo, al reconocimiento de peligros o catástrofes. Como ejemplos de sistemas de recogida de datos que funcionan desde satélites meteorológicos no geoestacionarios puede citarse el Argos y el SRD de Brasil. La tercera generación de Argos (Argos-3), ya operativa en satélites de la serie Metop, NOAA-19 y un satélite SARAL.

Esos satélites NOAA, Metop y SARAL siguen una órbita polar a 850 km de altitud, pasando por encima de los polos Norte y Sur a cada revolución. Los planos orbitales giran alrededor de los ejes polares a la misma velocidad que la Tierra alrededor del Sol. Cada satélite ve simultáneamente y en todo momento todas las balizas dentro de un círculo de unos 5 000km de diámetro. Con el movimiento del satélite, la trayectoria de ese círculo en tierra forma una banda de 5 000km de ancho que circunda la Tierra pasando por los polos Norte y Sur.

Actualmente, el sistema Argos funciona en la banda 401,579-401,690 MHz a través de miles de plataformas (conocidas como terminales transmisores de plataforma) cada una de las cuales requiere sólo unos pocos kHz de anchura de banda. Aprovechando el carácter polar de las órbitas de estos satélites, es posible acomodar muchas plataformas Argos. Unas 22 000 plataformas están en funcionamiento. Cada una de ellas se caracteriza por un número de identificación único y depende de su electrónica de transmisión.

La duración de transmisión de cada mensaje es inferior a un segundo. La generación del sistema Argos-3 introduce nuevos servicios de recogida de datos que ofrecen transmisiones de datos a alta velocidad (4 800 bit/s) y capacidad de interrogación en plataforma. Dependiendo de la velocidad binaria los valores de potencia de salida de la plataforma van de -3 dBW a 7 dBW.

La plataforma conocida como transceptor de mensajería de plataforma (PMT, *platform messaging transceiver*) es interrogada por satélites que utilizan la banda 460-470 MHz y es efectuada actualmente a 465,9 MHz.

Para la cuarta generación del sistema Argos (Argos-4), cabe esperar que la capacidad del sistema y la anchura de banda aumenten significativamente mediante la utilización de otras bandas de frecuencias indicadas en la Figura 2-3. Además, el nuevo sistema Argos-4 implementará un enlace descendente en la banda de frecuencias 464,98775-466,98775 MHz y un acceso múltiple por ensanchamiento de espectro, a fin de no causar interferencias a usuarios terrenales.

El SRD de Brasil se basa en los satélites SCD (órbita con inclinación de 25°) y CBERS y utiliza la banda 401,605-401,665 MHz para la recepción en la plataforma de recogida de datos. Debido a la compatibilidad del SRD de Brasil con el sistema Argos y con satélites en órbita complementaria, el intercambio de datos entre ambos sistemas tiene lugar desde 2001.

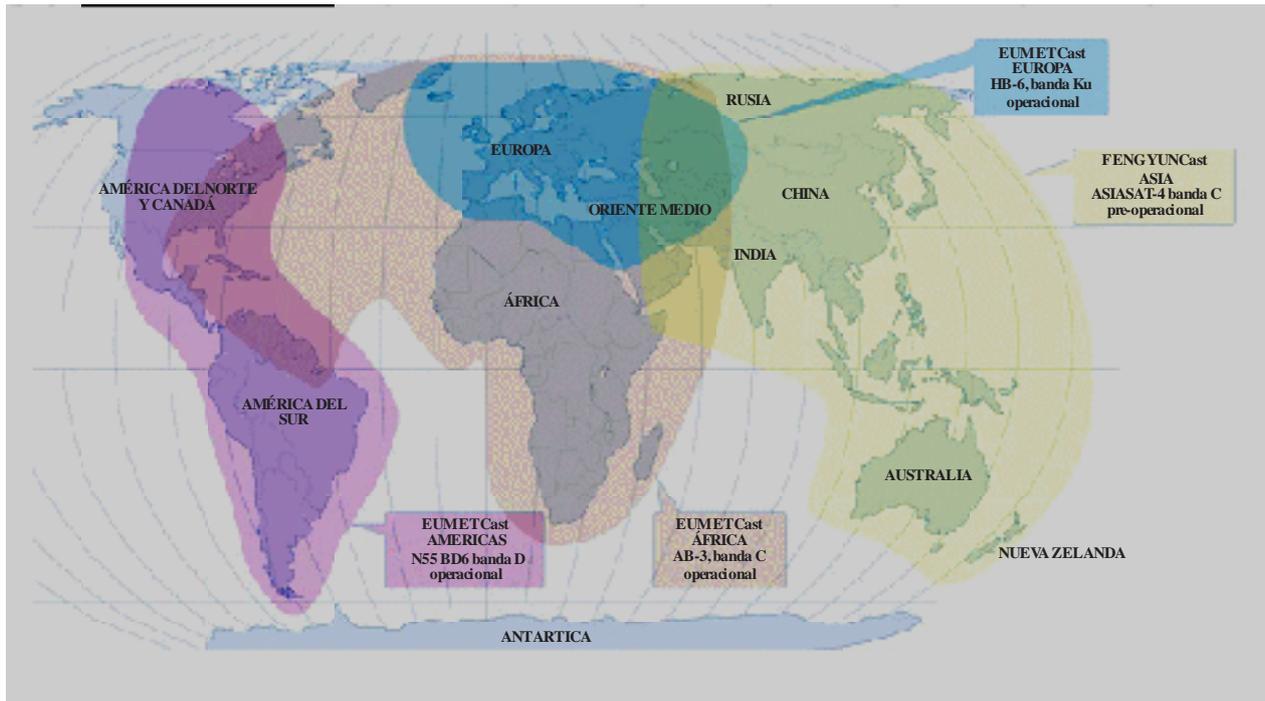
## 2.4 Mecanismos alternativos de difusión de datos

Además de los mecanismos tradicionales de difusión de datos de los sistemas MetSat OSG y no OSG, se está estableciendo un sistema adicional de difusión, denominado GEONETCast (véase la Figura 2-4), que es una iniciativa del Sistema Mundial de Observación de la Tierra (GEOSS, *Global Earth Observation System of Systems*) para desarrollar un sistema mundial de recogida y distribución de datos sobre observaciones de la Tierra, operacional y de extremo a extremo, utilizando la actual infraestructura de telecomunicaciones comerciales. El concepto GEONETCast consiste en utilizar la capacidad de multidifusión de una red mundial de satélites de comunicaciones para transmitir datos y productos medioambientales de satélite e *in situ* de los proveedores a los usuarios. Para ello, varios centros regionales asumen la responsabilidad de establecer y mantener un sistema regional de distribución por satélite basado en la tecnología de radiodifusión de vídeo digital (DVB, *Digital Video Broadcast*), y proporcionan servicios complementarios a una comunidad de usuarios común. Están asociados actualmente, entre otros, la Administración Meteorológica China (CMA), la Administración Nacional para Mediciones Oceánicas y Atmosféricas (NOAA), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y EUMETSAT, así como muchos socios potenciales proveedores de datos.

La cobertura mundial se obtiene mediante la integración del sistema CMACast, que abarca la región Asia-Pacífico, la componente GEONETCast Américas, que abarca las Américas, y el sistema EUMETCast, que abarca Europa, África y las Américas.

FIGURA 2-5

Cobertura mundial de GEONETCast



## CAPÍTULO 3

**SERVICIO DE AYUDA A LA METEOROLOGÍA**

	<i>Página</i>
3.1	Introducción ..... 22
3.1.1	Bandas de RF atribuidas ..... 22
3.1.2	Funciones meteorológicas del MetAids ..... 23
3.2	Ejemplos de sistemas de detección MetAids ..... 25
3.2.1	Radiosondas ..... 25
3.2.2	Radiosondas en paracaídas..... 26
3.2.3	Cohetes sonda ..... 27
3.3	Factores que repercuten en las características de los sistemas MetAids ..... 27
3.3.1	Sistema de antena receptora en tierra..... 28
3.3.2	Sistemas de procesamiento en tierra ..... 29
3.3.3	Módulos sensores no recuperables..... 29
3.4	Características de las observaciones meteorológicas requeridas por el servicio MetAids.... 30
3.5	Justificación de las versiones nacionales de las operaciones del servicio MetAids..... 33
3.5.1	Tecnología disponible ..... 33
3.5.2	Diferencias en la climatología de los vientos de altitud..... 34
3.5.3	Diferencias en la densidad de las redes..... 34
3.5.4	Utilización de la banda 401-406 MHz ..... 35
3.5.5	Utilización de la banda 1 668,4-1 700 MHz ..... 35
3.5.6	Requisitos para la retención de ambas bandas ..... 35
3.6	Tendencias para el futuro ..... 36

### 3.1 Introducción

El servicio de ayudas a la meteorología (MetAids) se define en el número 1.50 del RR como un servicio de radiocomunicación destinado a las observaciones y los sondeos utilizados en meteorología, con inclusión de la hidrología. El presente capítulo sólo trata de la observación de la atmósfera superior *in situ*, las demás aplicaciones de MetAids se tratan en el Capítulo 6 del presente Manual.

En la práctica, el servicio MetAids suele proporcionar el enlace entre un sistema local de detección de parámetros meteorológicos y una estación base remota. El sistema local de detección puede ser transportado, por ejemplo, por un globo meteorológico. Otra alternativa es la de ser lanzado en paracaídas a través de la atmósfera desde un avión o un cohete meteorológico. La estación base puede encontrarse en una ubicación fija o montarse en una plataforma móvil como las que se utilizan en operaciones de defensa. Las estaciones base se transportan en barcos y en aviones destinados a la vigilancia de huracanes o a la investigación. La gran mayoría de esos sistemas de detección *in situ* son radiosondas, que en su mayoría son lanzados periódicamente desde ubicaciones fijas y un pequeño número de ellas desde barcos comerciales, y constituyen la red mundial SMO atmósfera superior de la OMM, conforme a un horario mundial fijo (00, 06, 12 y 18 UTC) establecido por la OMM.

#### 3.1.1 Bandas de RF atribuidas

Las bandas de frecuencia utilizadas por el servicio MetAids (además de las reguladas por disposiciones específicas) son las que figuran en el Cuadro 3-1<sup>2</sup>.

CUADRO 3-1

#### Bandas de frecuencias utilizadas por los sistemas/aplicaciones MetAids

Banda de frecuencias
400,15-401 MHz
401-402 MHz
402-403 MHz
403-406 MHz
1 668,4-1 670 MHz
1 670-1 675 MHz
1 675-1 690 MHz
1 690-1 700 MHz
35,2-36 GHz

En esas bandas también hay otros servicios primarios que imponen limitaciones importantes al servicio MetAids. La compartición de un mismo canal entre el MetAids y otros servicios no suele ser viable debido a la escasa potencia de transmisión de la mayor parte de los sistemas MetAids para enlaces de alcance relativamente largo. Por este motivo, la compartición de bandas se realiza principalmente por segmentación de las mismas. Esto puede organizarse a nivel internacional con otros sistemas meteorológicos bajo los auspicios de la OMM o a nivel nacional con los sistemas no meteorológicos.

La OMM publica periódicamente un catálogo actualizado de sistemas de radiosonda activos dentro de la red OMM (OMM No.9, Vol.A, que está siendo sustituido ahora por el registro de metadatos OSCAR/Surface WIGOS), de modo que los meteorólogos que utilicen las mediciones puedan determinar el tipo de radiosonda utilizada en cada una de las estaciones. Este catálogo contiene asimismo un registro de la banda de frecuencias utilizada.

<sup>2</sup> Para la atribución actual de frecuencias en estas bandas, véase el Artículo 5 del RR.

Entre los usuarios del servicio MetAids se encuentran asimismo:

- las agencias del medio ambiente;
- las universidades y los grupos de investigación meteorológica;
- los servicios de defensa.

Estos sistemas adicionales suelen funcionar con independencia de las operaciones habituales de los servicios meteorológicos nacionales y no se consignan en el catálogo de la OMM. Muchos de los sistemas MetAids ajenos a la OMM están montados en plataformas móviles y pueden desplegarse en un gran número de ubicaciones durante su funcionamiento. El número de radiosondas vendidas a estos grupos independientes es bastante próximo al de las utilizadas en la red OMM convencional. La explotación de sistemas adicionales no suele ser objeto de reglamentación por parte de las autoridades nacionales de radiocomunicación.

En ciertos países se evita la compartición de un mismo canal entre los distintos grupos de operadores de radiosonda gracias a la utilización de un plan detallado de canales. No obstante, en muchos países se sigue un planteamiento pragmático de utilización del espectro. Antes del lanzamiento de la radiosonda el operador del sistema de radiosonda explora el espectro MetAids disponible con el receptor de la estación base. Esto permite determinar si ya hay radiosondas funcionando cerca del lugar de lanzamiento. A continuación se escoge la frecuencia de la radiosonda a lanzar (sintonizándose antes del lanzamiento, de ser necesario) de modo que su funcionamiento no perjudique a los sistemas que ya se encuentren en vuelo. El espectro MetAids disponible para un servicio MetAids nacional suele estar limitado a una subbanda de la atribuida por el RR debido a los acuerdos de compartición nacional con otros servicios de radiocomunicaciones, como se ha indicado anteriormente.

Los sistemas de radiosondas disponibles en el mercado funcionan en la red OMM en las bandas de frecuencias 400,15-406 MHz y 1 668,4-1 700 MHz. La justificación para seguir utilizando estas dos bandas del servicio MetAids se indica en un Capítulo posterior, tras la exposición detallada de los sistemas utilizados.

### 3.1.2 Funciones meteorológicas del MetAids

La exactitud en las mediciones de la variación de la temperatura atmosférica, la presión, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento con la altitud son indispensables para la meteorología operativa. Estas mediciones definen las características básicas de los sistemas meteorológicos permitiendo al meteorólogo definir la situación probable a corto plazo. También constituyen la entrada a los modelos numéricos de predicción meteorológica que se utilizan para elaborar las predicciones a largo plazo. Se utilizan asimismo para la supervisión del clima. Las predicciones a corto plazo requieren una gran resolución vertical en las mediciones de temperatura y humedad relativa. Por ejemplo, la posición de las nubes próximas a la superficie necesita medirse con una precisión superior a 100 m en la dimensión vertical.

El MetAids ha sido durante muchas décadas la principal fuente de mediciones atmosféricas de alta resolución vertical. Además, esas mediciones *in situ* son esenciales para calibrar la teledetección a bordo de un vehículo espacial, en particular la detección pasiva. El MetAids transmite las mediciones locales de variables meteorológicas de la atmósfera desde posiciones situadas en la superficie a una estación base dotada de un receptor y de un sistema de proceso de datos. En la mayor parte de los casos se mide la presión (o altitud), la temperatura, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento. Pueden medirse asimismo componentes atmosféricos tales como el ozono, los aerosoles y la radioactividad. La salida de la estación base se transmite a las redes de comunicaciones meteorológicas integrándose con los datos procedentes de otras estaciones receptoras. Los MetAids no se suelen recuperar tras su uso, de modo que el coste del transmisor y del módulo de detección debe reducirse al mínimo.

En los sistemas MetAids más comunes, una radiosonda operacional puede transportarse en un globo meteorológico hasta 36 km por encima de la superficie, altitud a la que estalla el globo. La altitud requerida para las observaciones periódicas varía hasta cierto punto con la aplicación y la situación geográfica y, en muchos países, está limitada por el coste de los globos y del gas ascensional necesario. En muchos países, las operaciones meteorológicas habituales intentan alcanzar la altitud de 25 km por encima de la superficie, aunque ciertas estaciones necesitan efectuar sus mediciones a altitudes superiores a los 30 km. Las predicciones a escala mundial necesitan tener en cuenta los movimientos de la atmósfera en los niveles superiores, aunque con menos detalle que el necesario para las condiciones próximas a la superficie. No obstante, la supervisión

del clima a largo plazo y la investigación científica asociada necesitan efectuar mediciones de alta resolución a la máxima altitud posible en la atmósfera.

Las mediciones de las radiosondas se transmiten durante un máximo de dos horas a una estación base situada en el lugar de lanzamiento del globo. El globo se desplaza con los vientos de las capas atmosféricas superiores durante este tiempo y en ciertas ocasiones puede alejarse más de 250 km del punto de lanzamiento durante su ascenso. Durante su descenso, puede viajar otros 150 km. Los datos del descenso también se consideran posiblemente interesantes. La potencia de transmisión se mantiene siempre baja, por las limitaciones que imponen las baterías disponibles. Las baterías deben funcionar a temperaturas muy bajas como las existentes durante el vuelo y no deben perjudicar al medio ambiente ni constituir un peligro para la población al caer a tierra tras la explosión del globo.

Cada día se lanzan más de 1 400 radiosondas de la red SMO de la OMM de todas estas radiosondas, al menos 400 se utilizan para mediciones en los emplazamientos establecidos del Sistema Mundial de Observación de la Tierra (GCOS, *Global Climate Observing System*). La información proporcionada por las radiosondas operacionales la utilizan los servicios meteorológicos nacionales sin pérdida de tiempo para elaborar las predicciones locales. Esta información también es necesaria para elaborar las predicciones meteorológicas numéricas de todo el mundo con el objetivo de transmitir los boletines (en código meteorológico normalizado) a todos los servicios meteorológicos del mundo antes de tres horas. Además, los boletines se archivan permanentemente para utilizarlos en un gran número de investigaciones científicas. Otros sistemas MetAids desplegados actualmente, aunque en número más reducido, son los siguientes:

Tipo	Descripción
Radiosondas en paracaídas	Se lanzan en paracaídas desde aviones a gran altitud. Las radiosondas en paracaídas suelen transmitir durante media hora aproximadamente a la estación receptora situada en un avión.
Sondas cautivas	Transmiten continuamente desde un globo cautivo que se encuentra normalmente dentro de los límites de la atmósfera.
Cohetes sonda	Transmiten las mediciones atmosféricas a altitudes de hasta 95 km para la investigación científica especializada o se lanzan desde barcos para mediciones a baja altitud.
Pequeñas aeronaves no tripuladas (vehículo pilotado a distancia (RPV, <i>remotely piloted vehicle</i> ) y vehículo aéreo no tripulado (UAV, <i>unmanned aerial vehicle</i> ))	Transportan un módulo detector semejante a la radiosonda hasta zonas oceánicas remotas y transmiten asimismo información en forma de boletines meteorológicos normalizados.

Aparte de la SMO operacional, las aplicaciones de defensa e investigación de MetAids se utilizan para reconocimiento meteorológico a fin de mitigar catástrofes naturales e industriales.

El coste actual de las mediciones con radiosonda limita la separación óptima de la red operacional de radiosondas a 250 km en dirección horizontal. Esta separación, en la que se tiene en cuenta la deriva de los globos, se utiliza como norma para los estudios de redes sobre el espectro radioeléctrico necesario para el servicio operacional MetAids. No obstante, la resolución adecuada para la persistencia de las características de los sistemas meteorológicos organizados necesita que las mediciones se efectúen con una separación máxima de 50 km en dirección horizontal. La investigación meteorológica requiere esta separación en las mediciones con radiosondas y sondas en paracaídas. En el futuro, las atribuciones de frecuencia deberán atender tanto la utilización de las radiosondas operacionales como las de las comunidades de investigación.

La pequeña disminución del número de estaciones operacionales de radiosonda de la red SMO se compensa con la utilización cada vez mayor de las radiosondas por parte de los servicios medioambientales y de defensa. Además, los servicios meteorológicos nacionales están exigiendo la realización de más mediciones sobre el terreno en zonas oceánicas específicas. Se prevé un aumento importante de la utilización de los sistemas MetAids más modernos en la próxima década para dar respuesta a los requisitos de ampliación.

## 3.2 Ejemplos de sistemas de detección MetAids

### 3.2.1 Radiosondas

Cada año se llevan a cabo en todo el mundo más de 800 000 vuelos de radiosondas (Figuras 3-1 y 3-2). Además, se realizan otros 400 000 vuelos para diversas aplicaciones. Los emplazamientos de las estaciones de base para el lanzamiento de radiosondas suelen estar dotados de equipos especiales para que el lanzamiento de los globos pueda realizarse con independencia de las condiciones meteorológicas. Los emplazamientos más críticos están dotados de equipos de alimentación de reserva y del correspondiente alojamiento de modo que las mediciones puedan realizarse incluso en el caso de que las infraestructuras locales queden dañadas por condiciones meteorológicas extremas, por accidentes laborales o por otras circunstancias.

FIGURA 3-1

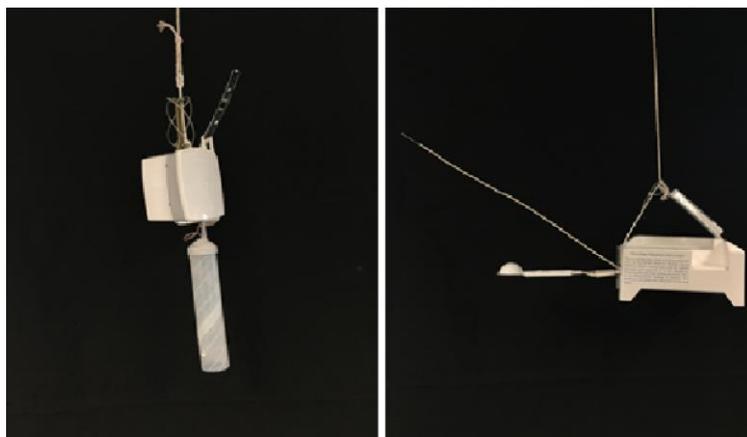
**Tren de vuelo de una radiosonda**



Meteo-03-01

FIGURA 3-2

**Radiosondas**



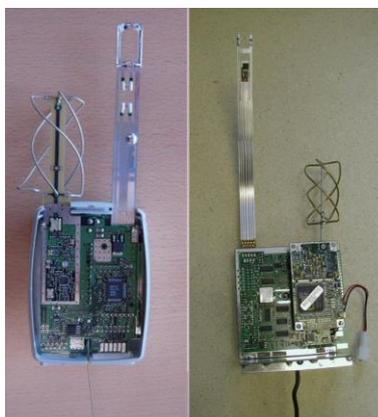
Meteo-03-02

Una radiosonda típica está integrada por varios elementos importantes: el transmisor, la batería, el módulo sensor y, normalmente, un receptor de ayuda a la navegación (NAVAID/GNSS, (p.ej. GPS) (Figura 3-3). El transmisor envía los datos a la estación receptora. Las radiosondas se suelen alimentar mediante baterías de litio o alcalinas que pueden soportar temperaturas ambiente inferiores a  $-90^{\circ}$  C. El módulo sensor contiene los detectores que miden condiciones atmosféricas tales como la temperatura, la presión, la humedad y, en determinados casos, el ozono y la radiación ionizante. El módulo sensor efectúa asimismo la codificación de los valores de los detectores necesaria para su transmisión a la estación en tierra.

Los sistemas de radiosonda miden los vientos siguiendo el movimiento del globo en la atmósfera. Los sistemas de seguimiento activo utilizan esencialmente un seguimiento de radar primario (seguimiento de un reflector de señales de radar situado bajo un globo), o secundario (seguimiento de un transpondedor integrado en una radiosonda) Los sistemas de seguimiento pasivo utilizan receptores NAVAIID/GNSS o, en algunas zonas costeras, retransmisores LORAN-C en la carga útil, y transmiten esos datos a la estación en tierra, o seguimiento de radioteodolitos de señales de radiosondas.

FIGURA 3-3

### Circuitos electrónicos de una radiosonda moderna



Meteo-03 -03

### 3.2.2 Radiosondas en paracaídas

Las radiosondas en paracaídas están integradas por componentes semejantes a los de las radiosondas convencionales, pero están diseñados de tal manera que puedan lanzarse en paracaídas desde un avión para determinar el perfil de la atmósfera durante su descenso (véase la Figura 3-4). Al no ser viable la utilización de grandes antenas de seguimiento en los aviones, todas las sondas de paracaídas funcionan en la banda 401-406 MHz y utilizan NAVAIID/GNSS para la medición del viento. En lo que se refiere a su operatividad, las radiosondas con paracaídas se despliegan con una densidad espacial y temporal muy superior a la de las radiosondas. Se utilizan principalmente para el seguimiento y definición de las tormentas tropicales sobre el mar. Pueden lanzarse y controlarse hasta 16 radiosondas en paracaídas simultáneamente. La gran densidad de su despliegue exige la utilización de transmisores de banda estrecha de gran estabilidad, similares a los utilizados en las partes más densas de la red de radiosondas. Las radiosondas en paracaídas también se utilizan para determinar el perfil de fenómenos climatológicos o el estado básico de la atmósfera en regiones oceánicas aisladas y, ocasionalmente, en tierra.

FIGURA 3-4

**Radiosonda con paracaídas**

Meteo-03 -04

**3.2.3 Cohetes sonda**

Los cohetes sonda son sistemas MetAids más especializados. Al igual que las radiosondas en paracaídas, son lanzadas desde cohetes que han alcanzado una altitud elevada y determinan el perfil de la atmósfera durante su descenso controlado en paracaídas. Los cohetes sonda pueden estar integrados por los mismos componentes básicos que las radiosondas, pero los módulos sensores para las mediciones a gran altitud pueden ser diferentes de los que integran los sistemas utilizados en las capas inferiores de la atmósfera. Al contrario que las radiosondas en paracaídas, pueden utilizar radiogoniometría o NAVAID/GNSS para la medición del viento. La mayor parte de los cohetes sonda se lanzan a una gran altitud y se utilizan típicamente como apoyo de las operaciones de lanzamiento espacial (véase la Figura 3-5). Debido al coste del despliegue de los cohetes sonda, resulta necesario utilizar transmisores de gran calidad.

FIGURA 3-5

**Cohete sonda**

Meteo-03 -05

### 3.3 Factores que repercuten en las características de los sistemas MetAids

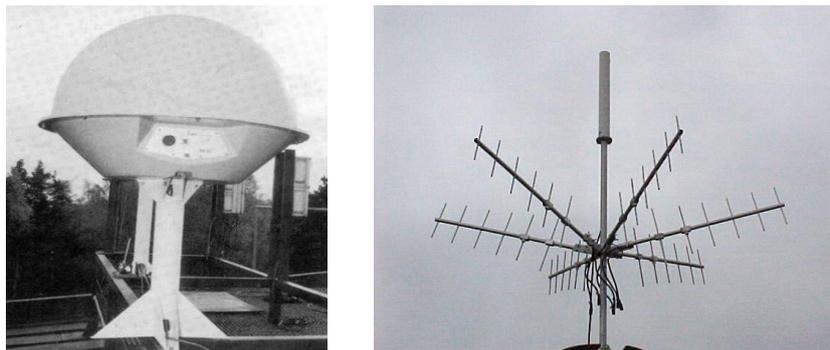
Los sistemas MetAids están integrados por varios componentes de radiocomunicaciones básicos. La sección de tierra del sistema contiene típicamente un sistema de antena/receptor y un sistema de procesamiento de la señal. La Recomendación UIT-R RS.1165 – Características técnicas y criterios de calidad de los sistemas de radiosondas del servicio de ayudas a la meteorología, contiene descripciones y parámetros técnicos de los diversos tipos de sistemas que se utilizan en las operaciones MetAids.

#### 3.3.1 Sistema de antena receptora en tierra

Las radiosondas, las radiosondas en paracaídas y los cohetes sonda utilizan un enlace de radiofrecuencia para transmitir los datos al sistema de antena y receptor ubicado en el emplazamiento de proceso de datos. Las bandas más comúnmente utilizadas a este fin son la de 400,15-406 MHz y la de 1 668,4-1 700 MHz. Lo normal es que el sistema de antena/receptor se encuentre en tierra (para las radiosondas y los cohetes sonda), pero en el caso de las sondas con paracaídas el sistema de antena/receptor se ubica en un avión. La configuración específica del sistema de antena y receptor varía en función de la banda de funcionamiento y la máxima distancia oblicua prevista durante el vuelo. En los sistemas que funcionan en la banda de 400,15-406 MHz (véase la Figura 3-6) se suelen utilizar antenas omnidireccionales y estructuras de radiales de antenas yagi o de reflectores diédricos. Estos tipos de antenas no necesitan tener una gran ganancia para mantener el enlace de RF. Para la medición de los vientos en esta banda no se utiliza la radiogoniometría. La ganancia de los sistemas de antena que funcionan en la banda 400,15-406 MHz oscila entre 0 y 10 dBi.

FIGURA 3-6

#### Sistemas de antenas omnidireccionales y directivas (401-406 MHz)



Meteo-03 -06

La medición del viento suele realizarse mediante radiogoniometría o seguimiento por radar en la banda 1 668,4-1 700 MHz. Algunos países todavía prefieren recurrir a la radiogoniometría para seguir una radiosonda que proporciona mediciones del viento con un receptor NAVAID/GNSS incorporado, lo que también permite utilizar una radiosonda sin receptor NAVAID/GNSS incorporado para la lectura del viento por radiogoniometría. Por este motivo se utilizan plataformas de seguimiento equipadas con grandes antenas parabólicas o paneles de antenas controladas por fase para evitar las pérdidas de trayecto (véase la Figura 3-7). La plataforma de la antena hace girar la antena en acimut y elevación para seguir el movimiento de la MetAid. Los sistemas de antena que funcionan en la banda 1 668,4-1 700 MHz suelen tener ganancias características de 25-28 dBi.

FIGURA 3-7

**Sistemas de antenas de seguimiento (1 668,4-1 700 MHz)**

Meteo-03 -07

**3.3.2 Sistemas de procesamiento en tierra**

El receptor transfiere la señal de la radiosonda en banda base a un sistema de procesamiento de la señal que decodifica los datos analógicos o digitales de la radiosonda y genera los datos de las mediciones atmosféricas requeridas, entre ellas las de los vientos. Algunas MetAids no transmiten a la estación receptora valores meteorológicos reales (presión, temperatura, humedad, ozono, vientos, etc.), sino que transmiten las características electrónicas de los sensores, datos NAVAID/GNSS, para minimizar el coste del procesamiento en la MetAids. El sistema en tierra de procesamiento de señal aplica los valores resistivos o capacitivos del sensor y sus valores de calibrado a un polinomio a fin de calcular los parámetros meteorológicos. Otros MetAids pueden realizar la mayoría del tratamiento de señales en el MetAids y transmitir directamente valores y vientos meteorológicos reales. En este caso, el sistema de procesamiento en tierra sólo puede efectuar un subconjunto del procesamiento de datos global.

**3.3.3 Módulos sensores no recuperables**

El carácter de las operaciones del servicio MetAids impone restricciones a su proceso de fabricación. La mayor parte de las limitaciones de diseño repercuten en las características de radiofrecuencia de las MetAids no recuperables y por lo tanto en los requisitos espectrales de las operaciones MetAids. La restricción más importante es el coste de producción de los dispositivos. No obstante, hay otras limitaciones tales como la densidad, masa, entorno operativo y rendimiento de potencia, que afectan considerablemente a los fabricantes y a los operadores.

El coste de producción suele ser la primera cuestión que suscita la construcción de transmisores de mayor rendimiento espectral. Las radiosondas son dispositivos no recuperables. Es normal que se lancen una sola vez y no se recuperen; sólo algunas pocas se recuperan y se reacondicionan para volver a ser utilizadas de nuevo. Es necesario reducir al mínimo la complejidad de los circuitos electrónicos a fin de abaratar el coste en la medida de lo posible. Los progresos tecnológicos permiten utilizar circuitos integrados rentables que mejoran el rendimiento de las radiosondas. Tradicionalmente, muchas de las mejoras incorporadas a las radiosondas han permitido incrementar la precisión de las mediciones de los sensores. Sin embargo, en los últimos años, los operadores se han visto obligados a mejorar algunas de las características de RF a fin de aumentar la densidad de las redes. El resultado es que la mayoría de los diseños de radiosondas de los principales fabricantes mundiales cumplen normas relativamente estrictas de la ETSI con respecto a la anchura de banda de emisión y la radiación en banda lateral. Muchos de los dispositivos de radiosonda básicos tienen transmisores de una sola etapa. Estos dispositivos son sensibles a los cambios de temperatura, de la tensión de

las baterías y de la carga capacitiva de la antena durante su manejo. Actualmente está aumentando el empleo de circuitos integrados específicos de aplicación (ASIC) disponibles en el mercado, ya que cada vez se cuenta con más dispositivos adecuados que pueden funcionar con gamas de temperatura extremas.

Hay que limitar la densidad de MetAids no recuperables por motivos de seguridad. Asimismo, la masa de las MetAids no recuperables se limita por motivos de seguridad y de funcionamiento. Las MetAids deben diseñarse para garantizar que una colisión con un avión, por muy improbable que resulte, no dañe al avión ni ponga en peligro vidas humanas. La densidad sería el factor más importante si el dispositivo fuera a ser absorbido por el motor. La masa de estos dispositivos es un factor importante ya que las MetAids no recuperables terminan cayendo a la superficie terrestre tras el vuelo. Para controlar la velocidad de descenso se utiliza a menudo un paracaídas. No obstante, los objetos cuya masa es importante pueden eventualmente causar daños. Actualmente, la mayor parte de los MetAids no recuperables tienen una masa muy inferior a 1 kg (sin el globo). Las radiosondas se suelen alojar en cajas de espuma de poliuretano, de cartón o de plástico, muy ligeras y fácilmente destruibles. Los circuitos impresos son pequeños y tienen pocos componentes y el diseño de los circuitos persigue maximizar el rendimiento de potencia. Las limitaciones de densidad y de masa impiden la utilización de grandes baterías para alimentar estos dispositivos.

Las sondas MetAids pueden quedar expuestas a condiciones extremas durante el vuelo. La temperatura puede oscilar entre 50° C y -90° C, la humedad puede variar entre condiciones de extrema sequedad y las de condensación, sublimación o precipitación. A altitudes superiores, la escasez de aire para la ventilación de los sistemas electrónicos y la radiación solar pueden provocar un sobrecalentamiento de éstos incluso a bajas temperaturas. Estos cambios tan radicales de las condiciones ambientales pueden tener graves repercusiones en la calidad de funcionamiento y las características de los dispositivos componentes, incluido el transmisor. Los transmisores de las radiosondas de diseño antiguo solían tener desviaciones 5 MHz o más debido a los grandes cambios de temperatura y a otros efectos, como la congelación de la antena que genera una carga capacitiva. Debido a la limitación del consumo de energía y a los efectos del calor generado sobre la calidad de funcionamiento de los sensores, no resulta práctico establecer un control estricto de la temperatura de los sistemas electrónicos. Por otra parte, se ha puesto de manifiesto que muchos de los circuitos integrados para transmisores existentes en el mercado y utilizados por la industria de las telecomunicaciones inalámbricas no pueden funcionar a temperaturas extremadamente bajas.

En la fase de diseño debe prestarse gran atención al consumo de energía de los sistemas electrónicos MetAids. Las baterías grandes aumentan el peso y suponen un peligro potencial para la seguridad, además el peso adicional incrementa los costes de explotación por necesitar globos más grandes y mayor volumen de gas para inflarlos. El rendimiento energético es el principal motivo por el que se diseñan las MetAids de modo que la potencia de salida del transmisor sea lo más pequeña posible sin perjuicio del mantenimiento de un enlace de teledividida fiable. Los transmisores de las radiosondas suelen generar entre 100-400 mW y el presupuesto del enlace a la distancia máxima sólo tiene un margen de enlace del orden de 0,5-2 dB. El transmisor de una sola etapa utilizado normalmente ha resultado tener un gran rendimiento energético, mientras que los transmisores de diseño más moderno consumen entre 150-250% más de energía que los de una sola etapa. Hay que indicar, no obstante, que los transmisores de una sola etapa son vulnerables a los cambios bruscos de temperatura y que la carga capacitiva de la antena durante el funcionamiento provoca un gran desplazamiento de frecuencia. Por este motivo, el aumento de rendimiento espectral de los transmisores repercute tanto en sus costes de fabricación como en los de los sistemas electrónicos asociados.

### **3.4 Características de las observaciones meteorológicas requeridas por el servicio MetAids**

En este punto se exponen las características de las observaciones requeridas por las operaciones del servicio MetAids junto con ejemplos de mediciones de radiosondas.

La Figura 3-8 muestra las mediciones de temperatura y humedad relativa en función de la altitud, realizadas en un emplazamiento de observación meteorológica a 60° N en el Reino Unido (en Lerwick, Islas Shetland, el 23 de enero de 2000). El error de las mediciones de la temperatura de la radiosonda es pequeño, inferior a 0,5° C a altitudes de 28 km como máximo, lo que resulta conveniente para la supervisión del clima. En esta observación, la temperatura disminuyó a una velocidad relativamente uniforme desde la superficie hasta una altitud de 12 km aproximadamente. Los meteorólogos denominan a este nivel tropopausa y representa el límite entre el aire que interacciona con la superficie terrestre y el aire de la estratosfera donde la interacción con las capas superficiales es mínima. Entre la superficie y la parte superior de la tropopausa, aparecen capas relativamente delgadas en las que la temperatura o

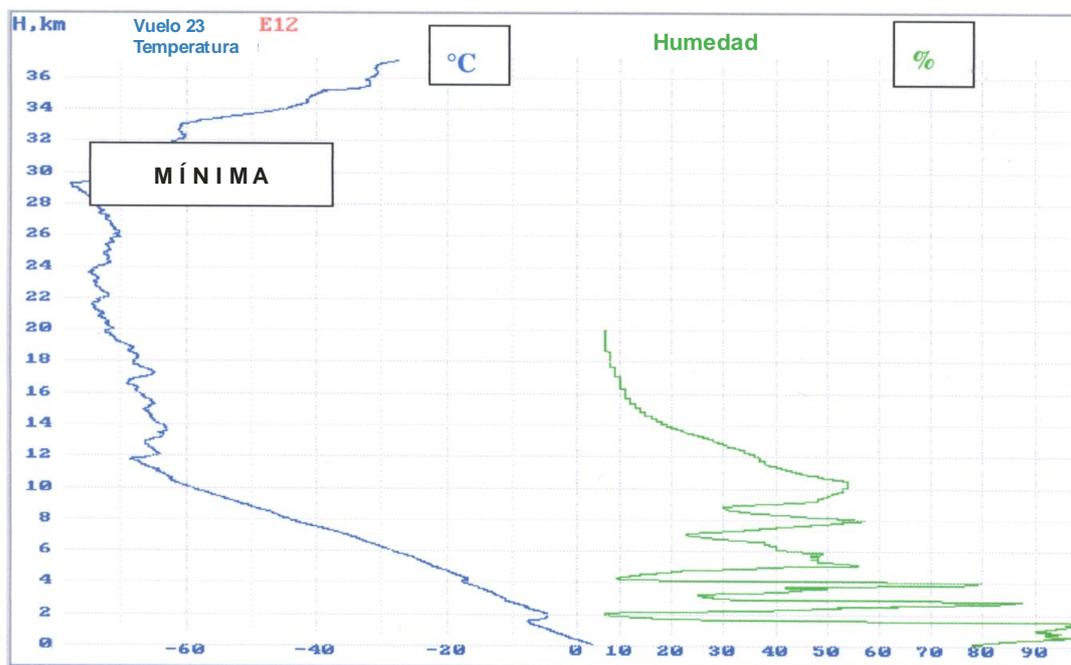
bien aumentaba ligeramente con la altitud o disminuía muy lentamente. La humedad relativa disminuyó asimismo muy rápidamente durante el ascenso de la MetAids a través de dichas capas. Las bajadas más importantes tuvieron lugar a altitudes de 1,8 km y 4 km en capas que los meteorólogos denominan de inversión térmica. Además, se observaron cambios menos pronunciados en el gradiente térmico vertical cerca de 8 km y 10,3 km, asociados asimismo con una reducción importante de la humedad relativa con la altitud. Las variaciones de la velocidad vertical de cambio de la temperatura y la humedad repercuten en la propagación de las ondas radioeléctricas en la atmósfera. Por este motivo, las observaciones MetAids son asimismo útiles para la determinación de las condiciones de propagación radioeléctrica.

Los globos que transportan las radiosondas se diseñan para optimizar la altitud a la que revientan para ascensos a aproximadamente 300 m/min. Las pérdidas de recepción significativas en las primeras fases del ascenso (aunque sean tan sólo de 10 s) son indeseables puesto que ello impide que la radiosonda resuelva los cambios de temperatura y humedad relativa cerca de la superficie necesarios para elaborar las predicciones locales. La pérdida de datos durante cuatro o cinco minutos (aunque se trate tan sólo de recepción defectuosa de la señal de medición del viento debido a problemas en la navegación) exige a menudo el lanzamiento de una segunda radiosonda para satisfacer los requisitos operacionales.

La observación de la Figura 3-8 es bastante representativa puesto que las mediciones de la humedad relativa oscilaban entre el 5% y el 90% entre la superficie y la altitud a la que la temperatura desciende por debajo de  $-40^{\circ}\text{C}$ . Al caer la temperatura por debajo de  $-60^{\circ}\text{C}$  a 10 km, la respuesta del sensor de humedad relativa empezó a ser demasiado lenta para resolver satisfactoriamente los rápidos cambios de la humedad relativa. Esto constituye una mejora notable en la calidad de funcionamiento del sensor de humedad relativa de la radiosonda desde 1980. Los sensores de humedad relativa más antiguos dejaban de ser fiables a temperaturas comprendidas entre  $-30^{\circ}\text{C}$  y  $-40^{\circ}\text{C}$ . El sensor de humedad relativa es el más difícil de fabricar y constituye uno de los obstáculos más importantes para el diseño y fabricación de radiosondas sin grandes inversiones a largo plazo en instalaciones de diseño y producción.

FIGURA 3-8

**Medición de la temperatura y de la humedad con radiosonda**

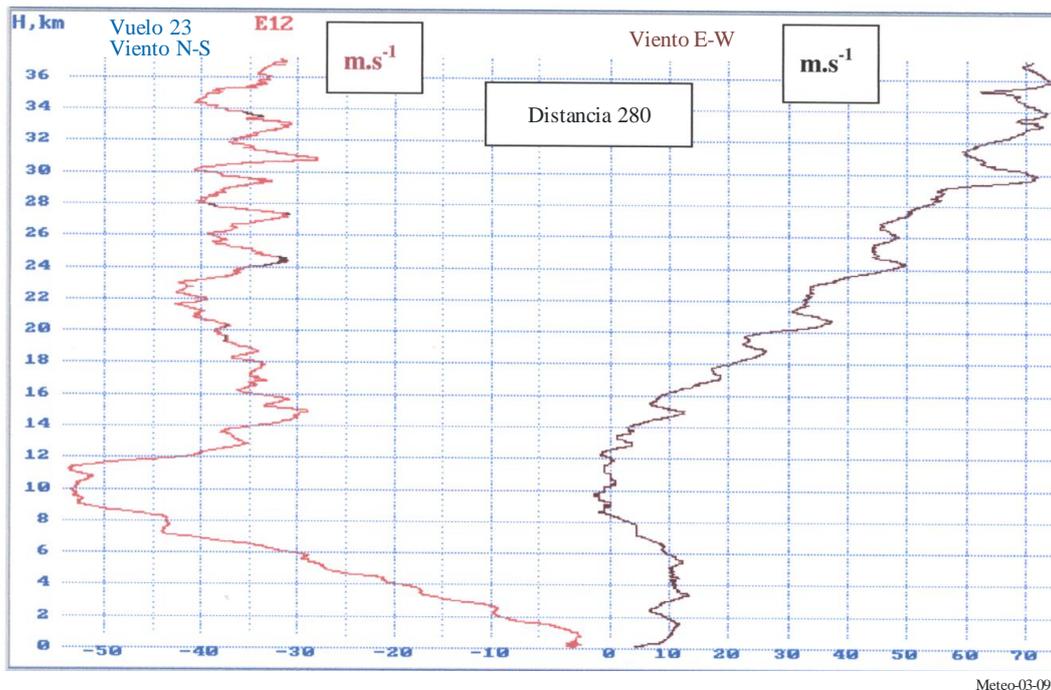


Debido a limitaciones en la tecnología de los sensores, las mediciones de humedad finalizan a una altitud de 20 km. La temperatura mínima en la Figura 3-8 corresponde a unos 29 km<sup>3</sup>. El brusco aumento de la temperatura por encima de 29 km puede atribuirse al importante calentamiento que se produce como resultado de los movimientos de las capas atmosféricas superiores durante los inviernos en el hemisferio septentrional.

La Figura 3-9 muestra las mediciones del viento resultantes del seguimiento de la posición del mismo vuelo de radiosonda (lanzado desde el Reino Unido, Lerwick, Islas Shetland, el 23 de enero de 2000) de la Figura 3-8. El movimiento de la radiosonda se calculó utilizando señales de navegación Loran-C recibidas por la radiosonda y retransmitidas a la estación base. La precisión prevista a corta distancia es de 0,5 ms<sup>-1</sup> aproximadamente en cada una de las dos componentes ortogonales que se muestran, disminuyendo hasta 1,5 ms<sup>-1</sup> para distancias más largas, cuando la retransmisión a la estación base es inferior a la óptima. En la dirección N-S los vientos más fuertes se detectaron a altitudes de 10 km y 12 km, con una corriente en chorro centrada cerca de la discontinuidad de temperatura a 10 km de la Figura 3-8. Aquel día, la componente E-W era débil cerca del máximo de la corriente en chorro, pero la intensidad de dicha componente aumentó uniformemente a niveles superiores, de 14 km a 30 km. Este aumento del viento fue consecuencia de un gradiente de temperatura consistente de Sur a Norte, a todas las altitudes entre 14 km y 30 km, siendo el aire más frío al Norte, cerca del centro del vórtex polar. Las mediciones de los vientos de altitud son de un gran valor para los servicios de transporte aéreo y de defensa. Los resultados de las observaciones de una sonda MetAids, como los de la Figura 3-9, suelen transformarse en un código especial de defensa en la estación base para su transmisión a las unidades operacionales pertinentes.

FIGURA 3-9

#### Mediciones de viento con radiosonda

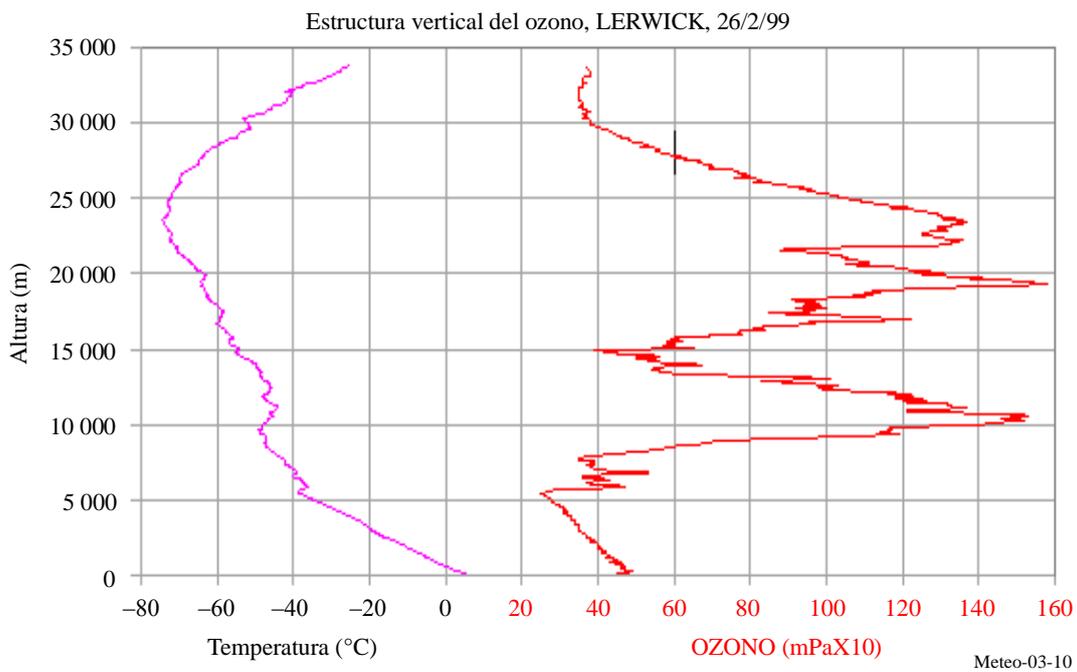


<sup>3</sup> En este punto, la temperatura ha caído hasta un valor próximo a las condiciones necesarias para que se inicien los mecanismos químicos que destruyen la capa de ozono durante los inviernos en el hemisferio septentrional.

La Figura 3-10 muestra una medición de la estructura vertical del ozono desde el mismo emplazamiento del Reino Unido que el de la Figura 3-8. Aquí, se representa la presión parcial del ozono en función de la altitud, junto con una medición simultánea de la temperatura. Las mediciones del ozono se realizan varias veces por semana como ayuda a las investigaciones científicas en curso. Las mediciones se transmiten inmediatamente a un centro de recogida de datos que coordina las observaciones de muchos otros emplazamientos de latitudes similares. Cuando se detecta una zona de vaciamiento de ozono grave se emiten alarmas. En la troposfera, es decir en las capas por debajo de 5 km aquel día, suele haber poco ozono. En la estratosfera, aparecieron concentraciones elevadas de ozono a 10 km y a 20 km, pero no a 15 km en este caso. La comunidad científica organiza las mediciones para determinar el motivo de la escasa concentración de ozono en la estratosfera. Esto puede ser provocado por el transporte natural de ozono desde las regiones de baja concentración.

FIGURA 3-10

**Medición de la distribución vertical de ozono mediante una ozonsonda**



**3.5 Justificación de las versiones nacionales de las operaciones del servicio MetAids**

**3.5.1 Tecnología disponible**

Aunque la mayor parte de los sistemas de radiosonda la suministra un número limitado de proveedores comerciales internacionales, las condiciones económicas o políticas de ciertos países requieren la creación de instalaciones nacionales para la fabricación de radiosondas en el propio país. En la práctica, el desarrollo de los sistemas nacionales se ha rezagado con respecto al de los sistemas de radiosondas de los proveedores comerciales durante las dos últimas décadas. De hecho, mientras que la tecnología de la mayor parte de los sistemas adquiridos en el mercado en todo el mundo tiene menos de 5 años de antigüedad, algunos sistemas nacionales siguen utilizando tecnología de hace 30-40 años. Las mediciones de estos sistemas nacionales son importantes para todos los meteorólogos por lo que hay que dar un plazo adecuado a estos países para la introducción de sistemas actualizados que utilicen más eficazmente el espectro de frecuencias radioeléctricas disponible.

### **3.5.2 Diferencias en la climatología de los vientos de altitud**

En la Figura 3-9 puede verse que el globo de este vuelo se desvió 280 km del punto de lanzamiento antes de su explosión y que después la radiosonda cayó en paracaídas a una distancia aún mayor. Para obtener datos fiables del viento a tamañas distancias es indispensable la utilización de radiosondas que reciban una señal GNSS. No es normal que los globos se desvíen tanto como éste. A latitudes elevadas en el invierno del Hemisferio Norte, los vientos a altitudes superiores a 16 km no suelen distribuirse simétricamente en torno al Polo. Por este motivo, son mucho más frecuentes los vientos estratosféricos de gran intensidad sobre Europa que en América del Norte. Por otra parte, hay muchos países cuyos vientos de altitud son siempre débiles. Las diferencias en las condiciones de los vientos de altitud provocan diferencias significativas entre las condiciones operativas de las redes de radiosondas nacionales pertinentes. En algunos países (p.ej. en los trópicos) las radiosondas siempre permanecerán a grandes altitudes y a corta distancia mientras que en otros debe efectuarse el seguimiento de las radiosondas hasta elevaciones inferiores a 5 grados por encima del horizonte y a distancias superiores a 200 km.

Cuando la elevación de los globos es grande (especialmente si no suelen presentarse elevaciones inferiores a 15 grados), los costes de medición de la radiosonda pueden reducirse utilizando radiosondas económicas que no necesiten recibir y procesar las señales NAVAJD/GNSS. En este caso, puede efectuarse el seguimiento de la radiosonda utilizando una antena de exploración direccional en la estación base. Si la radiosonda transmite a frecuencias en torno a 1 680 MHz, una antena direccional apropiada resulta mucho más pequeña que la antena correspondiente a frecuencias próximas a 403 MHz. Se prefieren las frecuencias próximas a 403 MHz para las operaciones de radiosonda a larga distancia por una diversidad de motivos, siendo además capaces de proporcionar una buena recepción y vientos precisos durante el ascenso.

A pesar de que las radiosondas para radares secundarios a 1680 MHz pueden ser muy baratas y no disponen de un receptor NAVAJD/GNSS ni de un sensor de presión, algunos países no tienen otra opción que utilizarlas.

En muchos países desarrollados, el coste de emplear un operador que supervise las mediciones de la radiosonda es demasiado elevado, resultando cada vez más necesaria la utilización de sistemas de lanzamiento de globos totalmente automáticos supervisados desde un emplazamiento remoto. Ya hay muchos de estos sistemas en funcionamiento. Estos sistemas siempre utilizan radiosondas NAVAJD/GNSS operando en la banda 400,15-406 MHz. El sistema automático debe disponer de dos radiosondas como mínimo, presentes en diferentes frecuencias de utilización en la banda. Al igual que en las operaciones manuales, si falla el lanzamiento de la primera radiosonda por una avería prematura del globo, la radiosonda puede continuar transmitiendo. Además, otra radiosonda lanzada desde un emplazamiento cercano puede estar utilizando ya la frecuencia nominal de la estación. El sistema de lanzamiento automático efectúa una exploración entre 400,15 MHz y 406 MHz antes del lanzamiento para comprobar que no haya ninguna radiosonda próxima transmitiendo a la frecuencia seleccionada. En ambas situaciones, debe haber una segunda frecuencia disponible a fin de realizar mediciones operativas.

### **3.5.3 Diferencias en la densidad de las redes**

La OMM ha definido y examina periódicamente los mínimos requisitos de densidad mundial y regional de las redes del servicio MetAids. Los requisitos espectrales del servicio MetAids varían de un país a otro en función de la densidad de sus redes. Los cálculos de necesidades del espectro deben realizarse con arreglo a toda la comunidad de usuarios del servicio, incluidas las agencias de defensa y del medio ambiente. Al aumentar la densidad de las redes se necesita mejorar el aprovechamiento del espectro. Los países que explotan redes más densas suelen disponer de los recursos presupuestarios necesarios para el funcionamiento del servicio MetAids con transmisores de mayor rendimiento espectral. En estos países suele haber más variación de las condiciones atmosféricas de un día a otro. Los países que explotan redes de baja densidad puede que no tengan los recursos necesarios para utilizar un gran número de estaciones.

### 3.5.4 Utilización de la banda 401-406 MHz

Algunos países europeos utilizan redes muy densas, con radiosondas de deriva mínima y emisiones de banda estrecha en dicha banda. Otros países utilizan sistemas de radares secundarios de banda ancha para los que la estación terrestre transmite un impulso a la radiosonda y ésta responde transmitiendo los datos meteorológicos. En ambos casos, se necesita prácticamente toda la banda de 400,15-406 MHz para las operaciones, habida cuenta de que entre 401 MHz y 403 MHz el servicio MetAids ha de coordinarse con las transmisiones de la plataforma de recogida de datos de los servicios SETS (espacio-Tierra) y MetSat (Tierra-espacio).

Hay ciertas zonas del planeta en las que existe un número limitado de estaciones de lanzamiento. En tales casos puede haber recursos disponibles para que los transmisores puedan liberar parte de la banda para otros usos. En Australia, por ejemplo, no se requiere toda la banda y la administración ha optado por utilizar una porción de la banda para otros servicios de radiocomunicaciones. Por consiguiente, en algunos países puede haber espectro disponible para otros usos, pero en ciertas regiones del mundo se necesita toda la banda para las operaciones MetAids. La OMM llegó a la conclusión de que se necesita toda la banda 400,15-406 MHz para el funcionamiento del servicio MetAids en el futuro previsible y también determinó que las operaciones de radiosonda convencionales en la banda 400,15-401 MHz no sería posible en el futuro debido a que no es viable la compartición cocanal con los servicios por satélite.

### 3.5.5 Utilización de la banda 1 668,4-1 700 MHz

La situación de la banda 1 668,4-1 700 MHz es distinta de la correspondiente a la de la banda 401-406 MHz. Concretamente, aunque toda la banda está atribuida al servicio MetAids, también está atribuida al servicio MetSat a título primario en igualdad de condiciones. Las operaciones MetAids y MetSat en el mismo canal no son compatibles y se ha producido una segmentación significativa de la banda. MetAids provoca niveles de interferencia importantes en las estaciones terrestres MetSat. La utilización de la banda de 1 680 MHz varía a lo largo del planeta, aunque en algunas partes (América del Norte, Europa y Asia), sólo está disponible la subbanda 1 675-1 683 MHz para las operaciones MetAids. Al estudiar los requisitos del servicio MetAids en la banda 1 668,4-1 700 MHz hay que tener en cuenta que sólo suele estar disponible una porción de esta banda. La mayoría de los países pueden operar con 7-8 MHz de espectro, pero hay otros en los que todavía se necesita más de 15 MHz para efectuar las operaciones.

### 3.5.6 Requisitos para la retención de ambas bandas

La disponibilidad de ambas bandas de RF para las operaciones del servicio MetAids se considera crítica para la viabilidad de las actividades meteorológicas. En primer lugar hay ciertos países de Europa y de América del Norte en los que se necesitan ambas bandas para cumplir los requisitos espectrales de las operaciones del servicio MetAids, habida cuenta de los arreglos de compartición existentes con otros servicios. Las operaciones del servicio MetAids para la meteorología sinóptica, la investigación y la defensa no pueden llevarse a cabo con una sola de estas bandas. Además, cada banda tiene características peculiares necesarias para los distintos tipos de operaciones del servicio MetAids. En la banda 401-406 MHz las pérdidas de propagación son bajas. Estas pérdidas de propagación son convenientes en aquellas partes del mundo en las que los vientos de gran intensidad provocan grandes distancias oblicuas entre la estación base y la radiosonda. La menor pérdida de propagación permite así mismo utilizar para el seguimiento del vuelo antenas receptoras más sencillas y de menor tamaño. Las operaciones MetAids en esta banda utilizan una forma de radionavegación (GNSS) para la medición de los vientos ya que el tamaño de las antenas RDF resultaría prohibitivo. Por motivos presupuestarios o de seguridad nacional, algunas administraciones prefieren utilizar la banda 1 668,4-1 700 MHz. Para esa banda, el servicio MetAids con RDF evita la necesidad de sistemas electrónicos de radionavegación reduciendo el coste de los dispositivos no recuperables. Algunos países explotan sus sistemas MetAids de manera independiente de los sistemas NAVAID/GNSS internacionales, ya que éstos pueden no estar siempre disponibles.

### **3.6 Tendencias para el futuro**

Aunque los diseños MetAids suelen utilizar componentes muy sencillos y económicos, ha habido una evolución, y continuará habiéndola, para mejorar la calidad de funcionamiento de estos sistemas. Como se ha indicado anteriormente, la mayor parte de la inversión en mejoras se destina a la calidad de los sensores y no siempre a la porción del enlace telemétrico del sistema. No obstante, la creciente necesidad de atribuciones adicionales de frecuencia en una zona determinada para dar soporte a las operaciones sinópticas y a las no sinópticas ha demostrado mejoras en las características de RF.

Además, la aplicación de los GNSS a las radiosondas para efectuar las mediciones de los vientos está teniendo como consecuencia una importante mejora en el rendimiento espectral de las radiosondas NAVOID/GNSS. En la mayor parte de los países también supone una mejora importante en la precisión de las mediciones de los vientos de altitud y de la altitud. La disponibilidad de pequeños receptores GNSS de bajo coste permite ahora procesar completamente la señal GNSS a bordo del MetAids y que sólo se transmitan datos del viento y la posición. Actualmente ya no se necesita que muchas aplicaciones transmitan datos GNSS «diferenciales» para recuperar la calidad de los datos GNSS y eso limita el volumen de datos que se deben transmitir.

## CAPÍTULO 4

**RADARES METEOROLÓGICOS**

	<i>Página</i>
4.1	Introducción ..... 38
4.1.1	Tipos de radares meteorológicos..... 38
4.1.2	Ecuación del radar..... 39
4.2	Radares meteorológicos ..... 40
4.2.1	Requisitos del usuario ..... 40
4.2.2	Redes de radares meteorológicos ..... 41
4.2.3	Aspectos operacionales de la reflectividad ..... 42
4.2.4	Esquemas de emisión de radares meteorológicos, estrategias de exploración y modos operacionales..... 44
4.2.5	Radares Doppler..... 49
4.2.6	Radares de doble polarización ..... 49
4.2.7	Productos de base del radar meteorológico convencional ..... 49
4.2.8	Diagramas de antena y dinámica de antena ..... 54
4.2.9	Requisitos de espectro actuales y futuros..... 55
4.2.10	Vulnerabilidad de los radares meteorológicos ..... 58
4.2.11	Vulnerabilidad de los sistemas que comparten espectro con radares meteorológicos ..... 66
4.2.12	Futuras tendencias..... 67
4.3	Radares de perfil del viento (WPR) ..... 68
4.3.1	Requisitos de usuario ..... 68
4.3.2	Aspectos operativos y de frecuencia..... 70
4.3.3	Requisitos espectrales actuales y futuros ..... 71
4.3.4	Aspectos de la compartición de los radares de perfil del viento ..... 72

## 4.1 Introducción

Los radares meteorológicos en tierra funcionan en el servicio de radiolocalización y se utilizan para meteorología operacional, predicción del tiempo, investigación de la atmósfera y navegación aeronáutica y marítima. La mayoría de los radares meteorológicos funcionan continuamente las 24 horas del día y desempeñan un cometido fundamental en los procesos de alerta inmediata por fenómenos meteorológicos e hidrológicos. Representan la última barrera de defensa contra la pérdida de vidas y propiedad en caso de inundaciones repentinas o severas tormentas y, por consiguiente, se encuentran entre los instrumentos meteorológicos que más vidas han salvado.

Los radares meteorológicos son normalmente radares de exploración de volumen con haz estrecho que detectan y miden las intensidades de los hidrometeoros y las velocidades del viento. Se utilizan para predecir la formación de huracanes, tornados y otros fenómenos meteorológicos peligrosos y determinan el curso de las tormentas en su camino de destrucción. Los radares modernos permiten determinar el trayecto de las tormentas, ya sean grandes o pequeñas, y proporcionan información sobre las intensidades de precipitación, que se utiliza para predecir la posibilidad de inundaciones repentinas. Además, proporcionan información pertinente sobre vientos intensos y posibles rayos. Los radares meteorológicos también son muy interesantes en el servicio de meteorología aeronáutica, en particular para detectar condiciones de congelamiento en aeronaves y prevenir situaciones climatológicas extremas de navegación.

Este Capítulo trata de los radares en tierra utilizados normalmente en meteorología y sus especificidades en comparación con otros radares.

### 4.1.1 Tipos de radares meteorológicos

El primero y más conocido de los tipos de radar es el radar meteorológico. Estos radares proporcionan datos de un volumen centrado en su propio emplazamiento. Sobradamente conocidos, la información que suministran estos radares aparecen normalmente en las predicciones meteorológicas que salen por televisión. El Cuadro 4-1 proporciona la lista de bandas de frecuencias utilizadas generalmente para el funcionamiento de los radares meteorológicos.

CUADRO 4-1

#### Principales bandas de frecuencias utilizadas por los radares meteorológicos

Banda de frecuencias (MHz)	Nombre de la banda comúnmente utilizado en la comunidad meteorológica
2 700-2 900	Banda S
5 250-5 725 (principalmente 5 600-5 650 MHz)	Banda C
9 300-9 500	Banda X

El radar de perfil del viento (WPR, *wind profiler radar*) es el segundo tipo de radar meteorológico. Estos radares proporcionan datos de la velocidad del viento en un volumen de forma aproximadamente cónica dirigido directamente sobre el radar. Si incorpora los equipos necesarios, p. ej. con altavoces o un sistema de sistema de sondeo radioacústico (RASS, *Radio Acoustic Sounding System*), un WPR también puede medir la temperatura atmosférica virtual (en función de la altitud). Las bandas de radiofrecuencia utilizadas por el WPR se encuentran normalmente en torno a 50 MHz, 400 MHz, 1 000 MHz y 1 300 MHz (véanse los detalles en la sección 4.3).

Un tercer tipo, menos común, es el radar auxiliar utilizado para el seguimiento de las radiosondas en vuelo. La utilización de estos radares se expone en el Capítulo 3, que trata de las radiosondas.

El cuarto tipo utilizado en la meteorología es el radar de nubes, que suele funcionar en torno a 35 GHz y 94 GHz a causa de la atenuación atmosférica relativamente baja. Los radares de nubes se utilizan para estudiar propiedades microfísicas de las nubes y otras partículas en la gama de sensibilidad del sistema de radar.

Todos los radares funcionan emitiendo señales radioeléctricas, que se reflejan en blancos tales como vehículos, aviones, gotas de lluvia o turbulencias atmosféricas. Aunque emiten señales de gran potencia, las señales de retorno de los radares son débiles porque la señal radiada debe recorrer el trayecto dos veces, una vez del radar al blanco y otra de vuelta al radar, lo que entraña una atenuación atmosférica en ambos trayectos. En el caso de radares meteorológicos, esta debilidad de las señales viene incrementada porque los blancos meteorológicos (ya sean gotas de precipitaciones (lluvia, granizo, nieve, ...) o en el caso del modo Doppler, polvo, insectos o simplemente perturbaciones atmosféricas) no es un reflector particularmente eficaz. La cantidad de señal devuelta depende de la reflectividad del blanco y puede variar en función del tamaño y la naturaleza de éste. La necesidad de captar estas señales débiles puede afrontarse de diversas maneras, por ejemplo utilizando potencias de transmisión superiores, grandes antenas con un producto de anchura de haz por ganancia elevado, receptores extremadamente sensibles y un gran tiempo de integración de las señales. Por consiguiente, es un requisito técnico que el espectro sea relativamente silencioso, es decir, que esté libre de interferencia y de ruidos electrónicos artificiales.

### 4.1.2 Ecuación del radar

La ecuación (4-1) del radar describe la relación entre la potencia de retorno y las características del radar y el blanco. La ecuación puede expresarse como sigue:

$$\overline{P_r} = \frac{\pi^3 \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot c \cdot \tau \cdot |K|^2 \cdot L \cdot Z}{2^{10} \cdot \lambda^2 \cdot R^2 \cdot \ln 2} \tag{4-1}$$

donde:

- $\overline{P_r}$ : potencia de retorno media (W)
- $P_t$ : potencia de salida del transmisor (W)
- $G$ : ganancia de antena (adimensional)
- $K$ : índice de refracción complejo (adimensional)
- $\lambda$ : longitud de onda del radar (m)
- $c$ : velocidad de la luz (m/s)
- $\theta$ : anchura de haz de la antena a potencia mitad (3 dB) (rad)
- $\tau$ : anchura del impulso
- $r$ : distancia al blanco
- $L$ : factores de pérdidas asociados a la propagación y a la detección del receptor (dB)
- $Z$ : reflectividad efectiva del radar (m<sup>3</sup>).

Reordenando los términos se obtiene una formulación más sencilla de la ecuación (4-2) del radar que muestra las diferentes contribuciones a la potencia recibida en términos de constantes, factores del radar y factores del blanco.

$$\overline{P_r} = \underbrace{\frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln 2}}_{\text{Constantes}} \cdot \underbrace{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot L}{\lambda^2}}_{\text{Factores del radar}} \cdot \underbrace{|K|^2 \frac{Z}{R^2}}_{\text{Factores del blanco}} \tag{4-2}$$

La ecuación (4-2) del radar puede aplicarse a un blanco distribuido si se cumplen las siguientes hipótesis:

- el blanco ocupa todo el volumen del impulso;
- las partículas están distribuidas a lo largo de la región de contribución;
- las partículas de precipitación son esferas dieléctricas homogéneas con diámetros pequeños comparados con la longitud de onda del radar;
- el tamaño de las partículas satisface la condición de dispersión de Rayleigh;
- la constante dieléctrica  $|K|^2$  y la distribución del tamaño de los dispersores son homogéneos en el volumen  $V$  considerado;
- el diagrama de antena puede aproximarse mediante la forma gaussiana;
- las ondas incidente y de retrodispersión presentan una polarización lineal;
- se desprecian los efectos de dispersión múltiple.

En la ecuación (4-3) aparece una forma logarítmica de la ecuación (4-2) del radar [Doviak y Zrníc, 1984]:

$$Z(Az, El, R) \text{ (dBZ)} = 10 \log (P_r) + 20 \log (R) - 10 \log (L_p) + 10 \log (C) \quad (4-3)$$

Esta ecuación es la más útil puesto que pone en evidencia la necesidad de identificar claramente los diversos parámetros del sistema para efectuar una medición de la reflectividad calibrada. Estos parámetros incluyen:

- la potencia recibida  $P_r$  (W),
- el alcance  $R$  (m),
- el acimut y los ángulos de elevación (grados),
- la pérdida de propagación en exceso  $L_p$  (dB), y
- la denominada constante del radar  $C$ .

La constante del radar normalmente incluye factores tales como anchura del haz de la antena, anchura del impulso, ganancia de conversión del receptor y pérdidas del sistema.

Hay que destacar que para los radares que realizan el seguimiento de blancos discretos la ecuación del radar indica una señal recibida proporcional a  $1/r^4$  (siendo  $r$  la distancia). Para radares meteorológicos, la situación es muy distinta porque blancos tales como las precipitaciones a menudo llenan todo el haz estrecho del radar. En este caso, la ecuación del radar indica una señal recibida proporcional a  $1/r^2$ . Por consiguiente, los radares meteorológicos permiten mayores distancias de detección, pero ello también significa que presentan una mayor sensibilidad a la interferencia que los radares típicos de control del tráfico aéreo.

## 4.2 Radares meteorológicos

### 4.2.1 Requisitos del usuario

Los meteorólogos utilizan radares meteorológicos para detectar, localizar y medir el volumen de precipitación dentro de las nubes o que se está descargando de las nubes, y determinar las velocidades y la dirección del viento utilizando el movimiento de la precipitación o de las partículas atmosféricas. Los radares miden la intensidad de la precipitación en periodos de tiempo específicos así como el movimiento de precipitación o de las partículas atmosféricas que se acercan o se alejan de la antena del radar meteorológico, permitiendo de esa

forma medir la rotación en los fenómenos meteorológicos. Se trata de un factor crítico para detectar fenómenos meteorológicos intensos tales como tornados o inundaciones repentinas y para proporcionar alertas tempranas. El principal requisito de usuario del radar meteorológico es detectar las precipitaciones sólidas y líquidas y estimar la intensidad de la precipitación y la velocidad radial.<sup>4</sup>

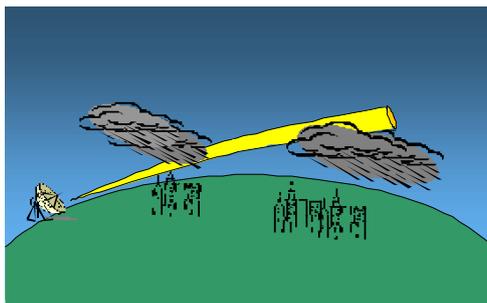
#### 4.2.2 Redes de radares meteorológicos

La principal limitación de los radares meteorológicos es que la intensidad de los ecos devueltos por determinados fenómenos meteorológicos tiende a disminuir al aumentar la distancia desde el radar. Ello se debe a la atenuación en espacio libre y a otros tipos de atenuaciones atmosféricas y también a que como la distancia hasta el radar aumenta, el haz del radar se eleva con respecto a la Tierra (debido a la curvatura de la Tierra y al ángulo de elevación del haz) y también se ensancha (véase la Figura 4-1).

Ello da lugar a una disminución en el porcentaje del fenómeno meteorológico iluminado por el haz. Si bien la parte superior del fenómeno puede aún ser observada por el radar, su parte inferior podría ya no ser visible. La precipitación que tiene lugar a una cierta distancia del radar puede permanecer sin detectar o puede mostrar una intensidad reducida limitando por tanto el alcance operacional cuantitativo del radar.

FIGURA 4-1

##### Descripción sintética del incremento de la altitud del haz del radar con la distancia



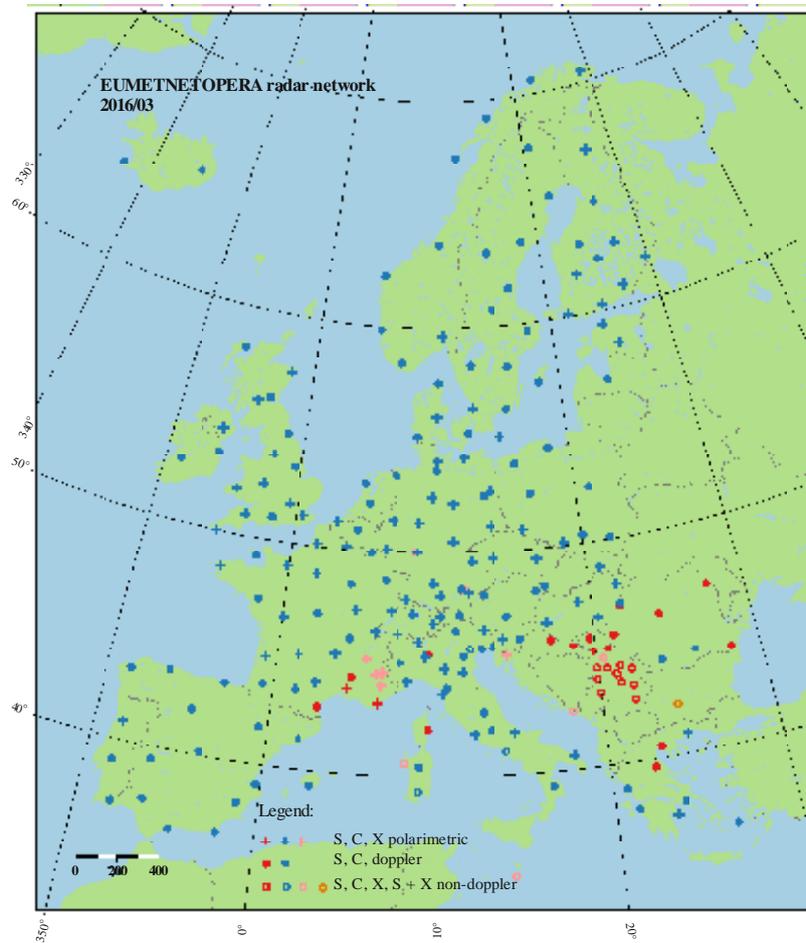
Meteo-04-0 1

Para evitar este problema, se instalan múltiples radares generalmente equiespaciados en redes distribuidas. Estas redes funcionan 24 horas al día y cubren normalmente grandes zonas tales como países o incluso parte de un continente a fin de poder detectar y seguir la evolución de los fenómenos meteorológicos, permitiendo de esa forma la emisión de alertas tempranas frente a peligros meteorológicos. En la Figura 4-2 aparece una red de ese tipo, que comprende radares de la banda S, la banda C y la banda X, instalados en Europa Occidental.

<sup>4</sup> Se trata de la velocidad de precipitación desplazándose hacia el radar o alejándose del mismo (en una dirección radial). No se indica ninguna información sobre la intensidad de la precipitación. La precipitación que se desplaza hacia el radar se considera que tiene una velocidad negativa y la precipitación que se desplaza alejándose del radar, una velocidad positiva. La precipitación que se desplaza de manera perpendicular al haz del radar (en un círculo alrededor del radar) tendrá una velocidad radial cero.

FIGURA 4-2

**Ejemplo de una red de radares meteorológicos  
(puesta al día marzo de 2016)**



Meteo-04-02

### 4.2.3 Aspectos operacionales de la reflectividad

La reflectividad es un término del radar relativo a la capacidad que tiene un blanco de radar de devolver energía. La reflectividad  $\eta$  de la lluvia se relaciona con la permitividad relativa  $\epsilon_r$ , el diámetro de la gota  $D$ , y la longitud de onda  $\lambda$ . Para las gotas de lluvia contenidas en el volumen  $V$  considerado, la reflectividad puede expresarse mediante la ecuación (4-4):

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_j D_j^6 / V \quad \text{m}^{-1} \quad (4-4)$$

donde  $|K|^2$  es 0,93 para el agua líquida y 0,18 para el hielo. La reflectividad se utiliza para estimar la intensidad de precipitación y las intensidades de lluvia y se mide a partir de la potencia devuelta.

Para eventos de precipitación en los que se conoce (o se supone), el tamaño de la gota de lluvia, el volumen de reflectividad puede relacionarse con el volumen total de agua líquida por unidad de volumen. El volumen total de agua junto con la distribución del tamaño de las gotas y la correspondiente velocidad terminal de la gota facilita el cálculo de la intensidad de lluvia.

El factor de reflectividad del radar  $Z$  puede definirse como sigue:

$$Z = \frac{1}{V_e} \sum_i D_i^6 \quad (4-5)$$

donde:

- $Z$ : volumen estimado en función de la sección transversal del número total de esferas del radar dispersor en dicho volumen
- $D$ : diámetro de la gota de agua
- $V_e$ : volumen efectivo de la gota.

El volumen  $Z$  está relacionado con la sección transversal del radar por unidad de volumen  $\eta$  mediante la expresión:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (4-6)$$

donde:

- $Z$ : volumen
- $\eta$ : sección transversal del radar por volumen unitario
- $\lambda$ : longitud de onda incidente
- $|K|$ : índice de refracción complejo.

Como el diámetro de las gotas de lluvia en el volumen de dispersión no es uniforme, las distribuciones de gotas de lluvia pueden aproximarse mediante la expresión:

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (4-7)$$

donde:

- $N(D)$ : concentración del número del diámetro
- $D$ : diámetro
- $\Lambda D$ : tamaño de intervalo
- $N_0$  y  $\Lambda$ : constantes para un fenómeno meteorológico determinado.

Cuando se conoce la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, el sumatorio  $\sum_i D_i^6$  por un volumen unitario viene dado por la expresión:

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (4-8)$$

Cuando la velocidad vertical del aire es cero la intensidad de lluvia,  $R$ , viene dada por:

$$R = \frac{\pi \rho}{6} \int_0^{\infty} D^3 v_t(D) N(D) dD \quad (4-9)$$

donde:

- $R$ : intensidad de lluvia
- $D^3$ : volumen de la gota de lluvia que es proporcional a  $Z$
- $v_t(D)$ : velocidad terminal de una gota de lluvia con un diámetro  $D$
- $\rho$ : densidad del agua.

Cuando  $N_0$  es constante, la relación  $Z$ - $R$  estimada puede describirse mediante la ecuación (4-10):

$$Z = AR^b \quad (4-10)$$

Donde  $Z$  normalmente se expresa como debe  $\text{dB}_Z = 10 \log Z \text{ (mm}^6/\text{m}^3\text{)}$  y  $A$  y  $b$  son constantes. ( $A$  es la constante de dispersión y  $b$  es un multiplicador). La relación  $Z$ - $R$  más comúnmente utilizada es la de Marshall-Palmer en la que:  $Z = 200 \cdot R^{1.6}$   $Z$  y  $R$  se expresan en  $\text{mm}^6/\text{mm}^3$  y en  $\text{mm/h}$ , respectivamente. La relación  $Z$ - $R$  sin embargo no es única. Tanto  $A$  como  $b$  dependen de la distribución del tamaño de las gotas (DSD, *drop size distribution*) que varía con el tipo de lluvia y su intensidad.

## 4.2.4 Esquemas de emisión de radares meteorológicos, estrategias de exploración y modos operacionales

### 4.2.4.1 Esquemas de emisión

Para asegurar el procesamiento de exploración de un volumen, en las denominadas «estrategias de exploración» (normalmente de una duración de 5-15 min), los radares meteorológicos utilizan distintos esquemas de emisión a diferentes elevaciones empleando conjuntos de diversas anchuras de impulso, frecuencias de repetición de impulsos y velocidades de rotación. No hay un solo esquema «típico» que varía en función de diversos factores tales como las capacidades del radar, el entorno del radar y los productos meteorológicos requeridos. Los esquemas están pues adaptados para cumplir lo mejor posible los requisitos.

Como ejemplo, una reciente encuesta sobre radares meteorológicos en la banda C en Europa mostró las siguientes amplias gamas de los diferentes parámetros del esquema de emisión:

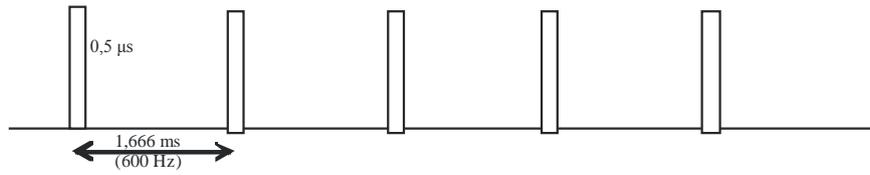
- Ángulo de elevación operacional entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .
- Anchura del impulso entre 0,5 y 3,3  $\mu\text{s}$  (para radares operacionales) para impulsos no comprimidos, mientras que algunos radares utilizan la compresión de impulsos con una anchura de impulso de 30  $\mu\text{s}$  a 350  $\mu\text{s}$  (teniendo cuenta de la utilización de la compresión de impulsos aumenta la anchura de banda requerida (3 a 6 MHz)).
- Frecuencia de repetición de impulsos (PRF) entre 250 y 2 400 Hz (para radares operacionales). Algunos radares existentes son capaces de PRF de hasta 20 000 kHz.
- Velocidad de rotación entre 1 y 10 rpm.
- Utilización en radares determinados con diferentes esquemas de emisión que combinan diferentes anchuras de impulsos y PRF y, en particular, PRF fijas, escalonadas o intercaladas (es decir distintas PRF durante un solo esquema).

En la Figura 4-3 aparecen ejemplos de diferentes esquemas de emisión.

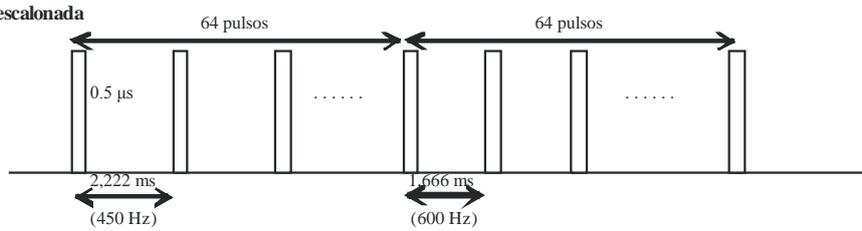
FIGURA 4-3

**Algunos tipos de esquemas de emisión de radares meteorológicos**

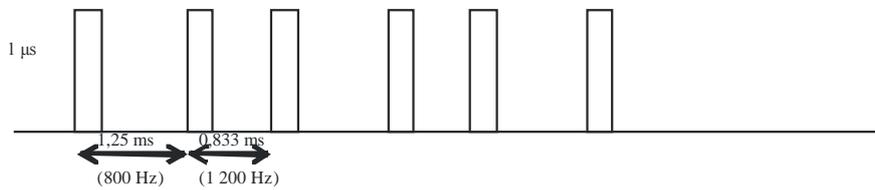
**PRF fija**



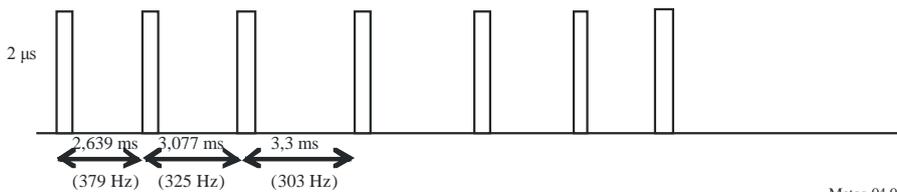
**PRF escalonada**



**PRF intercalada doble (PRT doble)**



**PRF intercalada triple (PRT triple)**



Meteo-04-03

Estos diferentes esquemas de emisión se utilizan en cierto número de radares como estrategia de exploración, durante la cual se transmite un esquema de emisión para distintas elevaciones y velocidades de rotación.

Hay que destacar que de un radar a otro, los valores de PRF y de anchura del impulso asociados con estos ejemplos de esquema varían en las gamas definidas anteriormente. Además, para un esquema determinado, las anchuras del impulso pueden variar de un impulso a otro.

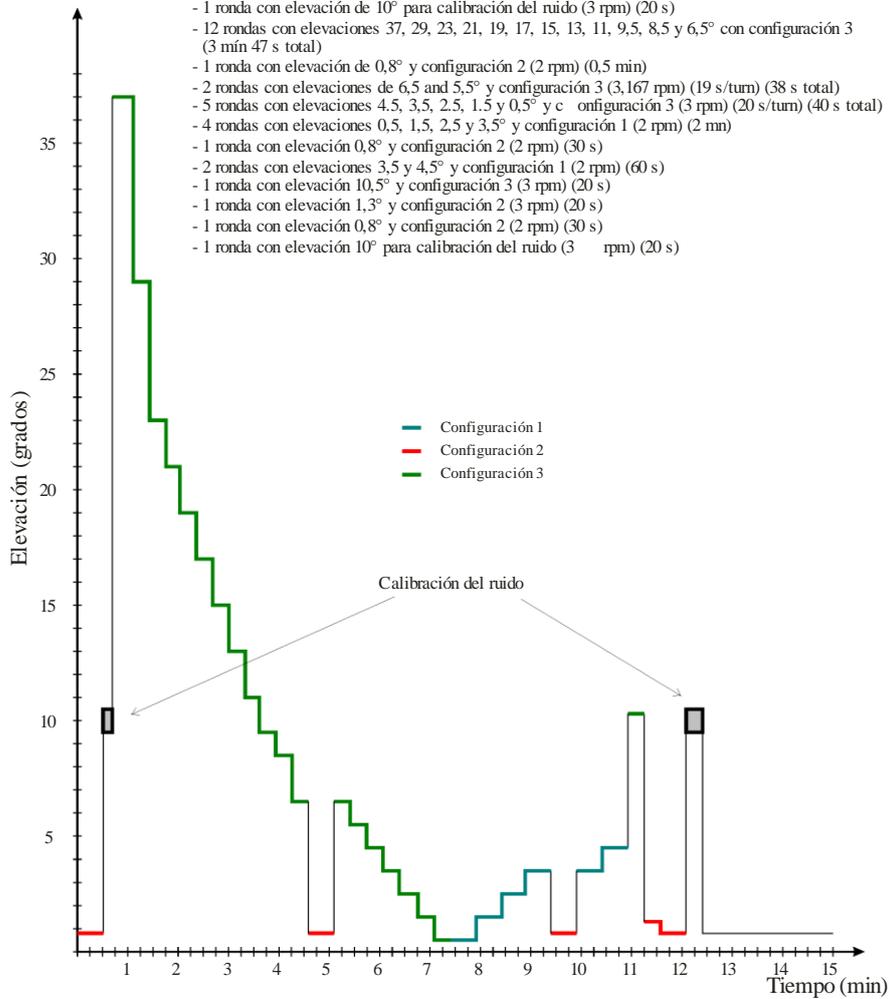
A continuación figura un ejemplo de estrategia de exploración:

FIGURA 4-4

**Descripción de una estrategia de exploración de un radar meteorológico**

Típica estrategia de exploración (tiempo total de unos 15 min):

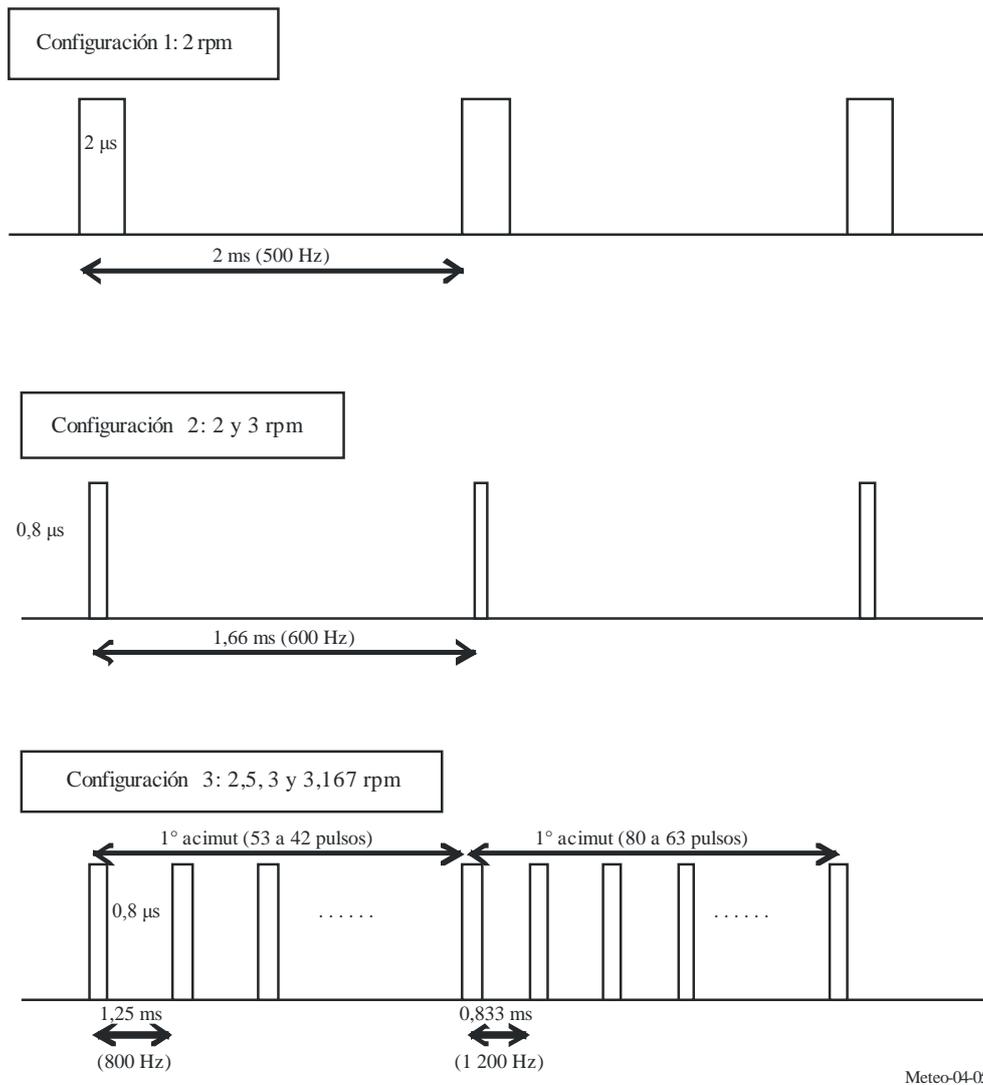
- 1 ronda con elevación de 0,8° y configuración 2 (2 rpm) (30 s)
- 1 ronda con elevación de 10° para calibración del ruido (3 rpm) (20 s)
- 12 rondas con elevaciones 37, 29, 23, 21, 19, 17, 15, 13, 11, 9,5, 8,5 y 6,5° con configuración 3 (3,167 rpm) (19 s/turn) (3 min 47 s total)
- 1 ronda con elevación de 0,8° y configuración 2 (2 rpm) (0,5 min)
- 2 rondas con elevaciones de 6,5 and 5,5° y configuración 3 (3,167 rpm) (19 s/turn) (38 s total)
- 5 rondas con elevaciones 4,5, 3,5, 2,5, 1,5 y 0,5° y configuración 3 (3 rpm) (20 s/turn) (40 s total)
- 4 rondas con elevaciones 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5° y configuración 1 (2 rpm) (2 min)
- 1 ronda con elevación 0,8° y configuración 2 (2 rpm) (30 s)
- 2 rondas con elevaciones 3,5 y 4,5° y configuración 1 (2 rpm) (60 s)
- 1 ronda con elevación 10,5° y configuración 3 (3 rpm) (20 s)
- 1 ronda con elevación 1,3° y configuración 2 (3 rpm) (20 s)
- 1 ronda con elevación 0,8° y configuración 2 (2 rpm) (30 s)
- 1 ronda con elevación 10° para calibración del ruido (3 rpm) (20 s)



Meteo-04-04

FIGURA 4-5

**Esquemas de emisión asociados con la estrategia de exploración de la Figura 4-4**



**4.2.4.2 Calibración del ruido**

Considerando la debilidad de la señal de retorno en los radares meteorológicos, el nivel de ruido debe extraerse de la señal para lograr las mediciones más precisas y recuperar los productos meteorológicos pertinentes.

Siendo  $N$  el nivel de ruido y  $S$  la señal útil (es decir, la señal de retorno meteorológica), los radares meteorológicos realizan el siguiente proceso:

- 1) Para cada puerta, el radar mide la señal de retorno correspondiente a la señal útil ( $S$ ) y el ruido ( $N$ ), es decir  $N + S$ .
- 2) Para determinar  $S$ , el radar extrae de  $N + S$ , el nivel de ruido  $N$ .
- 3) A continuación, a partir de  $S$ , el radar puede determinar todos los productos meteorológicos tales como la precipitación ( $dB_Z$ ) o la velocidad del viento mediante análisis Doppler.

Para obtener productos meteorológicos más precisos, la señal  $S$  debe ser lo más exacta posible, lo que significa que la calibración del ruido del radar, también llamada «Verificación cero», es un tema fundamental.

La «Verificación cero», se lleva a cabo por lo tanto de manera periódica ya sea durante las emisiones regulares del radar (por estimación) o durante periodos de tiempo de medición específicos (véase a continuación el ejemplo de estrategia de exploración) durante los cuales se mide el ruido.

En muchos casos, esta medición del ruido se realiza sin ninguna emisión del radar, (lo que podría en particular tener repercusiones en el diseño de algunos sistemas radioeléctricos destinados a detectar señales de radar para reducir la interferencia).

En todos los casos, la interferencia recibida durante la calibración del ruido corromperá todos los datos compilados hasta que se efectúe la calibración siguiente libre de interferencias. Esa interferencia podría hacer que se indicasen tasas de precipitación inferiores a las que se están produciendo realmente, con las evidentes consecuencias sobre los procesos operacionales y de alerta.

#### **4.2.4.3 Modos operacionales para radares meteorológicos**

En algunas redes, p. ej. NEXRAD en EE.UU., los radares funcionan en dos modos seleccionables por el usuario, a saber, modo en cielo despejado y modo precipitación. El modo en cielo despejado debe ser seleccionado manualmente por el usuario. El modo precipitación puede ser seleccionado manualmente en cualquier momento o automáticamente cuando el radar meteorológico detecta precipitaciones (a partir de valores predeterminados y en una cobertura de zona de reflectividad).

Por regla general, los radares meteorológicos aprovechan ambos modos.

##### **4.2.4.3.1 Modo en cielo despejado**

El modo en cielo despejado proporciona a los radares meteorológicos la posibilidad de detectar signos tempranos de actividad de precipitación.

Existen ciertas variables en la velocidad de bajo nivel y la densidad del aire que permiten detectar la posibilidad de precipitación. El radar utiliza una velocidad de exploración lenta junto con una frecuencia de repetición de impulsos (PRF) baja para lograr una capacidad de alta sensibilidad. Esta alta sensibilidad es ideal para detectar los pequeños cambios en las condiciones atmosféricas a largas distancias. El modo en cielo despejado es especialmente útil cuando hay poca o ninguna actividad convectiva en la gama de transmisión del radar y se adapta idealmente a la detección de signos que indican que se está desarrollando una tormenta u otros tipos de fenómenos climatológicos severos.

La elevada sensibilidad del radar meteorológico se debe al diagrama de exploración de volumen en el modo en cielo despejado. Seleccionando un diagrama en el modo cielo despejado, la antena del radar es capaz de permanecer durante un amplio periodo de tiempo en cualquier volumen de espacio determinado y recibir múltiples señales de retorno permitiendo a la vez el funcionamiento con un bajo nivel de  $S/N$ . La utilización de una anchura de impulso amplia y una baja PRF proporciona aproximadamente una potencia de eco de 8 dB para un dBz determinado de reflectividad.

##### **4.2.4.3.2 Modo precipitación**

El modo precipitación tiene un objetivo distinto que el modo en cielo despejado. La velocidad de exploración en modo precipitación es función del ángulo de elevación. Esta dependencia permite el mayor número posible de ángulos de elevación en el muestreo del volumen de radar total. El modo precipitación aprovecha los diagramas de cobertura de volumen para implementar distintos tipos de estrategias de exploración (véase un ejemplo en el § 4.2) con distinto muestreo de elevación. Los fenómenos meteorológicos supervisados normalmente en modo precipitación van asociados con el desarrollo de precipitaciones en que intervienen tormentas convectivas (lluvias torrenciales, granizo, tormentas severas, tornados, etc.) y sistemas sinópticos a gran escala.

##### **4.2.4.4 Supresión del eco fijo**

El denominado eco fijo se compone de varios elementos fijos ocultos; uno que incluye la dispersión de baja frecuencia y otro que incluye la de alta frecuencia (p.ej. debido a la vegetación agitada por el viento). Los ecos causados por blancos distintos a la precipitación se conocen como ecos parásitos y deben eliminarse. En los radares meteorológicos actuales se utilizan diversos métodos de supresión del eco parásito procedente del suelo:

- El filtrado Doppler emplea un filtro paso alto para reducir el eco parásito procedente del suelo. Este proceso es eficaz si la velocidad radial del viento es lo suficientemente alta como para estar por encima de la frecuencia de corte del filtro Doppler.
- El filtrado estadístico basado en el hecho de que la varianza de la lluvia es superior a la varianza de la reflectividad del eco parásito procedente del suelo. El proceso de filtrado estadístico es eficaz cuando la velocidad radial de la lluvia es nula (lluvia tangencial).
- El empleo del radar polarimétrico para la discriminación de la lluvia y del eco parásito procedente del suelo.

#### 4.2.5 Radares Doppler

Los radares meteorológicos Doppler se han utilizado durante más de 30 años en la investigación atmosférica para medir la convección dentro de las tormentas y para detectar frentes de ráfagas y en la actualidad se utilizan ampliamente en los sistemas de radares meteorológicos operacionales. A diferencia de los radares más antiguos, los equipos Doppler son capaces no sólo de determinar la existencia y posición de blancos reflectores sino también su velocidad radial. Ello permite la medición de la velocidad del viento, la detección de tornados y la medición de un campo de vientos por medio de la exploración en pantalla de la velocidad acimutal.

La supresión del eco parásito procedente del suelo es asimismo una importante funcionalidad. Los avances más importantes en este campo se centran en transmisores coherentes tales como klystrones (actualmente la tecnología más avanzada), tubos de ondas progresivas (TOP) o estado sólido. La integridad de fase del espectro del radar convencional estaba limitada por la tecnología de los magnetrones de la generación anterior, pero en los magnetrones modernos la integridad de fase es suficiente para cancelar eficazmente el eco parásito. Sin embargo, los actuales magnetrones pueden suministrar una gran potencia media a bajo coste para mejorar la relación señal/ruido.

#### 4.2.6 Radares de doble polarización

Los radares polarimétricos o de doble polarización transmiten impulsos con polarización horizontal (h) y vertical (v), que permite identificar dispersores por teledetección de sus formas y homogeneidad. Estos radares proporcionan una mejora significativa en la estimación de la intensidad de lluvia, la clasificación de las precipitaciones, la calidad de los datos y la detección de peligros meteorológicos con respecto a los sistemas no polarimétricos.

Para estimar las precipitaciones se tiene en cuenta ahora que al caer las gotas de lluvia tienden a aplanarse (esferoides oblatos), aumentando el aplanamiento con el tamaño de la gota en sentido horizontal. Combinando la reflectividad y los campos de polarización se pueden evaluar mejor los coeficientes  $A$  y  $b$  de la relación  $Z-R$  (4-10). Otros algoritmos basados en la fase diferencial  $\varphi_h - \varphi_v$  y la atenuación diferencial, se consideran muy prometedores para seguir mejorando la evaluación precisa de la pluviosidad.

Además de por su forma, los hidrometeoros se caracterizan por sus constantes dieléctricas, factor primordial en el cálculo de las secciones transversales de dispersión y atenuación. Las propiedades dieléctricas de los hidrometeoros varían con la frecuencia del radar, existiendo notables diferencias entre el agua y el hielo. Aprovechando estas características, se han implementado algoritmos para discriminar entre la lluvia y la nieve y para cuantificar el agua y el hielo en las nubes a partir de mediciones de la atenuación diferencial.

#### 4.2.7 Productos de base del radar meteorológico convencional

Un radar meteorológico Doppler genera tres categorías de productos de datos de base a partir de los retornos de señal: reflectividad de base, velocidad radial media y anchura del espectro. Todos los productos de nivel más elevado se generan a partir de estos tres productos de base. La precisión del producto de base se especifica a menudo como un requisito de calidad fundamental para el diseño del radar. Sin la precisión requerida en este nivel bajo, como se indica en el Cuadro 4-2, no puede lograrse la precisión del producto obtenida a nivel más elevado.

## CUADRO 4-2

## Requisitos de la precisión de los datos de base de un radar meteorológico representativo

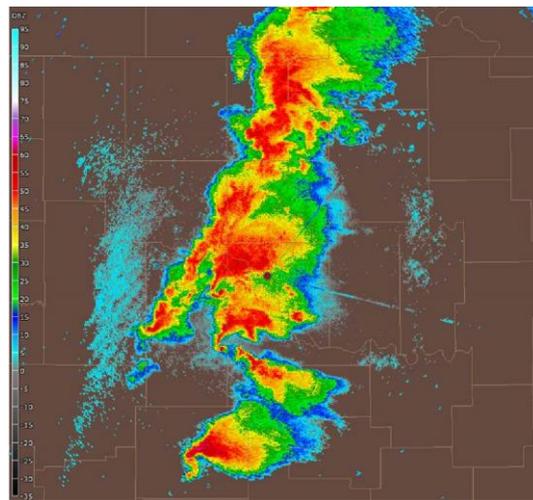
Producto de datos de base	Requisitos de precisión del diseño
Reflectividad de base	< 1 dB
Velocidad radial media	< 1 m/s
Anchura del espectro	< 1 m/s

## 4.2.7.1 Reflectividad de base

La reflectividad de base se utiliza en múltiples aplicaciones de radares meteorológicos, la más importante de las cuales es la estimación de la intensidad de lluvia. La reflectividad de base es la intensidad de los impulsos de retorno y se calcula determinando el valor medio lineal de la potencia de retorno. Toda interferencia que sufra el radar se añade a la potencia de los impulsos de retorno y deforma los valores de reflectividad. Las mediciones de reflectividad pueden resultar comprometidas si esta deformación rebasa los requisitos de precisión de los datos de base.

FIGURA 4-6

## Reflectividad de KOUN a las 22.34 UTC el 24/05/2011 durante un tornado



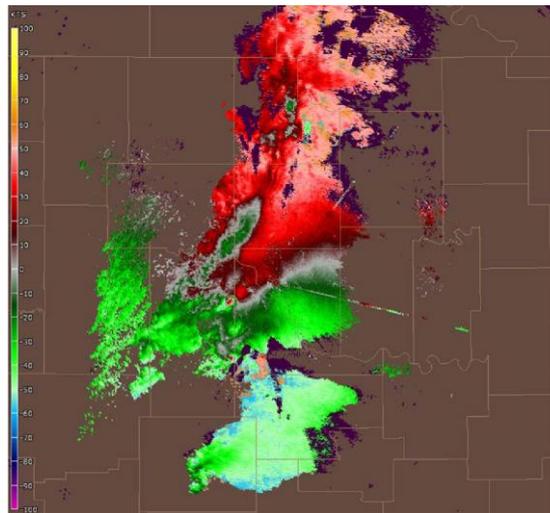
Meteo-0 4-06

## 4.2.7.2 Velocidad radial media

La velocidad radial media también se conoce como velocidad Doppler media y representa la velocidad media ponderada por la reflectividad de los blancos en una determinada muestra de volumen. La velocidad radial media se refiere al primer momento de la densidad espectral; la velocidad radial se refiere a los datos de base. Se determina normalmente a partir de un gran número de impulsos sucesivos y se calcula a partir del argumento de la varianza compleja de retardo única. El argumento de la covarianza compleja proporciona una estimación del desplazamiento angular del vector de señal Doppler de impulso de radar a impulso de radar. La velocidad angular del vector Doppler es igual al desplazamiento dividido por el intervalo de tiempo entre impulsos. El espectro Doppler revela la reflectividad y la distribución de las velocidades ponderadas del radar en el volumen del radar.

FIGURA 4-7

**Velocidad radial de KOUN a las 22.34 UTC el 24/05/2011 durante un tornado**



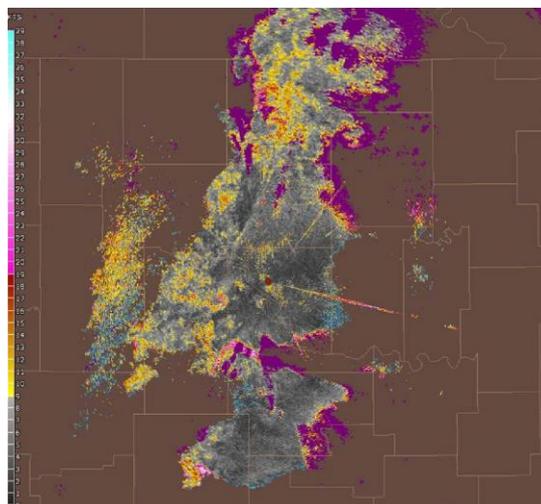
Meteo-04-07

### 4.2.7.3 Anchura del espectro

En el diseño de los radares meteorológicos, la anchura del espectro se calcula a partir de la simple correlación de retardos suponiendo una densidad espectral gaussiana. Es una medida de la dispersión de las velocidades dentro del volumen de muestra del radar y se trata de la desviación típica del espectro de velocidad. La anchura del espectro depende de los gradientes de la reflectividad y la velocidad a lo largo del volumen del impulso y de la turbulencia dentro del volumen del impulso [Doviak y Zrníc 1984].

FIGURA 4-8

**Anchura espectral de KOUN a las 22.34 UTC el 24/05/2011 durante un tornado**



Meteo-04-08

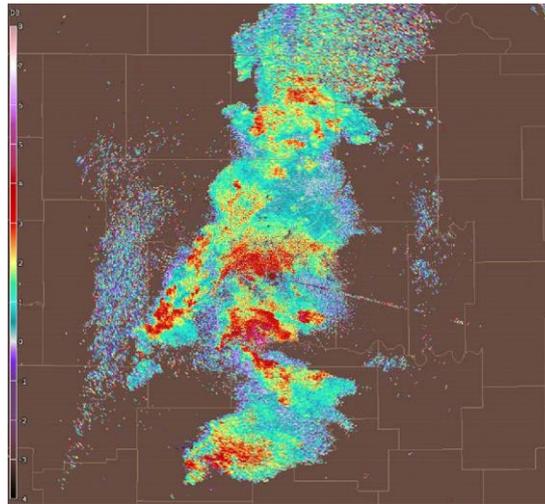
#### 4.2.7.4 Productos del radar meteorológico de polarización doble

##### 4.2.7.4.1 Reflectividad diferencial

La reflectividad diferencial es un producto asociado a los radares meteorológicos polarimétricos y se trata de la relación entre los retornos de potencia reflejada horizontal y vertical. Entre otras cosas, es un buen indicador de la forma de la gota. A su vez, esta forma es una buena estimación del tamaño medio de la partícula.

FIGURA 4-9

**Reflectividad diferencial de KOUN a las 22.34 UTC el 24/05/2011 durante un tornado**



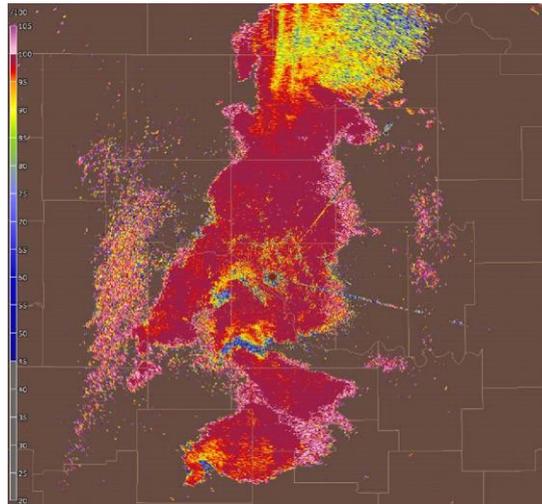
Meteo-0 4-09

##### 4.2.7.4.2 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es un producto del radar meteorológico polarimétrico y consiste en una correlación estadística entre los retornos de potencia reflejada horizontal y vertical. El coeficiente de correlación describe las similitudes en las características de retrodispersión de los ecos polarizados horizontalmente y verticalmente. Es un buen indicador de las regiones donde existe una combinación de tipos de precipitación, tales como lluvia y nieve.

FIGURA 4-10

**Coefficiente de correlación de KOUN a las 22.34 UTC el 24/05/2011 durante un tornado**



Meteo-0 4-10

#### 4.2.7.4.3 Relación de despolarización lineal

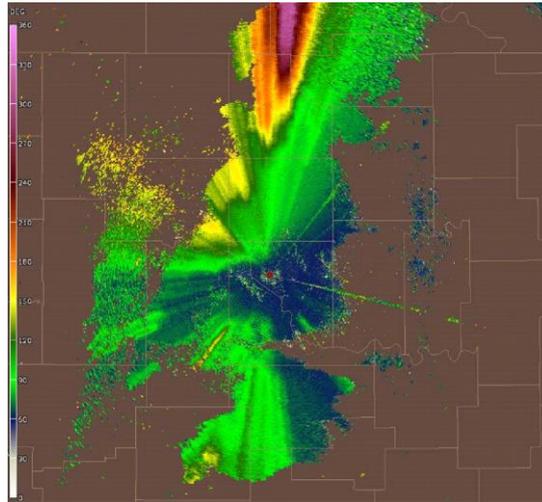
Otro producto del radar polarimétrico es la relación de despolarización lineal, que es la relación del retorno de potencia vertical de un impulso horizontal transmitido o del retorno de potencia horizontal de un impulso vertical (no representado). A semejanza del coeficiente de correlación, es una buena indicación de las regiones donde se producen combinaciones de tipos de precipitación.

#### 4.2.7.4.4 Fase diferencial

La fase diferencial es una comparación de la diferencia de fases de retorno entre los impulsos horizontal y vertical. Esta diferencia de fases viene causada por la diferencia en el número de ciclos de onda (o longitudes de onda) a lo largo del trayecto de propagación para las ondas con polarización horizontal y vertical. No debe confundirse con el desplazamiento de frecuencia Doppler, que está provocado por el movimiento de la nube y de las partículas de precipitación. A diferencia de la reflectividad diferencial, en el coeficiente de correlación y en la relación de despolarización lineal, que dependen de la potencia reflejada, la fase diferencial es un «efecto de la propagación». También se trata de un buen estimador de la intensidad de lluvia y de la atenuación causada por la lluvia. La fase diferencial específica (no representada), derivada de la fase diferencial, muestra la velocidad a la que se desplaza la fase. Es particularmente útil para identificar regiones de lluvia intensa.

FIGURA 4-11

Fase diferencial de KOUN a las 22.34 UTC el 24/05/2011 durante un tornado



Meteo-0 4-11

#### 4.2.7.5 Productos de datos derivados

Utilizando los productos de datos de base, el procesador elabora productos de datos derivados de nivel más elevado para el usuario del radar. Este documento no considerará detalladamente los productos de datos derivados pues estos productos varían de un radar a otro y el número de productos es bastante elevado. Para garantizar la precisión de los productos de datos derivados los productos de datos de base deben mantenerse con precisión.

#### 4.2.8 Diagramas de antena y dinámica de antena

##### 4.2.8.1 Diagramas de antena

Los radares meteorológicos utilizan normalmente antenas de reflector parabólico que producen un diagrama de antena de haz estrecho. Para producir una exploración de volumen se considera la dinámica de antena en los planos horizontal y vertical. En el § 4.2.4.1 anterior se dan ejemplos de esa dinámica.

Actualmente se utilizan tres modelos matemáticos para diagramas de antena de radares meteorológicos indicados en las Recomendaciones UIT-R F.699 (lóbulos laterales de cresta), UIT-R F.1245 (valor medio de los lóbulos laterales) y UIT-R M.1652. Aunque son representativas de antenas parabólicas, estas Recomendaciones suelen sobreestimar la anchura de haz de un diagrama de antena de haz estrecho.

Se señala que actualmente no hay ninguna ecuación del diagrama de radiación de antena de radar definida en el UIT R para representar dichas antenas de haz estrecho.

##### 4.2.8.2 Movimiento de la antena en la exploración de volumen

La cobertura horizontal y vertical requerida para que una exploración de volumen produzca un corte de elevación se logra girando la antena en el plano horizontal con un ángulo de elevación constante. La elevación de la antena se aumenta un valor previamente fijado tras cada corte de elevación horizontal. El ángulo de elevación más bajo oscila normalmente entre  $-2^\circ$  y  $1^\circ$  y la elevación más elevada es de  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , aunque algunas aplicaciones pueden utilizar elevaciones de hasta  $60^\circ$ . La velocidad de rotación de la antena varía dependiendo de las condiciones meteorológicas y de los productos requeridos en ese instante. Tanto la velocidad de rotación como la gama de elevación, etapas de elevación intermedia y frecuencia de repetición de impulsos se ajustan para obtener una calidad óptima. Una velocidad de rotación de antena baja proporciona un tiempo de inactividad largo en cada radial para lograr la máxima sensibilidad.

Una velocidad elevada de rotación de antena permite al operador generar una exploración de volumen en un corto periodo de tiempo cuando conviene cubrir todo el volumen lo más rápidamente posible. La variación de

los pasos de elevación y de la velocidad de rotación puede dar lugar a unos tiempos de adquisición de exploración de volumen que van desde un minuto hasta 15 minutos. Los largos periodos de tiempo para una exploración de volumen completa, en comparación con otros radares que giran con una elevación constante, hacen necesario realizar simulaciones dinámicas más largas para obtener muestras de resultados que sean significativamente estadísticos.

### 4.2.8.3 Otras estrategias de movimiento de antena

Los radares meteorológicos también utilizan otras estrategias de movimiento de antena para aplicaciones especiales e investigación. Las exploraciones de sector se emplean para obtener parte de un corte de elevación. Las exploraciones de volumen de sector realizan una exploración de volumen para una fracción de los 360° de acimut cuando la antena toma múltiples cortes de elevación. El tercer modo mantiene la antena a un acimut y elevación constantes para supervisar un punto específico en la atmósfera. Estas tres estrategias permiten al operador del radar concentrarse en una parte específica de la atmósfera.

### 4.2.9 Requisitos de espectro actuales y futuros

Como para algunas aplicaciones de radar, la elección de la banda de frecuencias (o longitud de onda  $\lambda$ ) es fruto principalmente de un compromiso entre el alcance/reflectividad, que varía como  $\lambda^{-4}$ , la atenuación debida a la lluvia, la precisión de las variables meteorológicas y el coste. La atenuación debida a las precipitaciones, que disminuye a medida que  $\lambda$  aumenta hasta llegar a ser despreciable para las longitudes de onda decimétricas, es una consideración muy importante. Por ejemplo, la banda Ka (en torno a 35 GHz, 8,6 mm de longitud de onda) es muy adecuada para la detección de gotas de agua pequeñas, como las que forman las nubes que no precipitan ( $\leq 200 \mu\text{m}$ ) mientras que, por otro lado, la banda S (2 700-2 900 MHz, 10 cm de longitud de onda) es más adecuada para detectar lluvia intensa a gran distancia (hasta 300 km) en climas tropicales y templados.

#### 4.2.9.1 Bandas de frecuencias de los radares meteorológicos

Las tres bandas más comúnmente utilizadas en los radares meteorológicos son la banda S (frecuencia nominal 2 700-3 000 MHz), la banda C (frecuencia nominal 5 250-5 725 MHz), y la banda X (frecuencia nominal 9 300-9 500 MHz). Los valores exactos de las frecuencias de las bandas asignadas figuran en las normas aceptadas (IEEE 2002).

La banda S (2 700-3 000 MHz, 10,7 cm de longitud de onda nominal) es la mejor opción en cuanto a precisión cuantitativa y calidad de funcionamiento a larga distancia, debido a los bajos valores de atenuación para la absorción gaseosa y la atenuación debida a las precipitaciones (Fabry, 2015; Doviak, 1993). La mayor longitud de onda también beneficia la mitigación del alcance – Cuestiones de ambigüedad Doppler (Doviak, 1978 y 1979). No obstante, el coste interviene en la elección de la banda S porque la mayor longitud de onda requiere mayores componentes físicos y una antena de mayores dimensiones para determinados requisitos de anchura de banda y ganancia.

La banda C (5 250-5 725 MHz, 5,4 cm de longitud de onda) se suele emplear en climas templados y en países con zonas razonablemente pequeñas que requieren cobertura. Puede ser un compromiso interesante entre los parámetros antes mencionados, permitiendo la detección de lluvia a grandes distancias (hasta 200 km) aunque su cuantificación se vería de hecho limitada más lejos de 100 km y ofrecería la ventaja de un menor coste resultante de una potencia inferior y un menor tamaño de antena en comparación con los radares de frecuencias más bajas con la misma resolución espacial.

Los radares meteorológicos en la banda X (9 300-9 500 MHz, 2,5-3,2 cm de longitud de onda) son más sensibles y pueden detectar partículas de menor tamaño pero, como experimentan una atenuación más intensa, se utilizan únicamente para observación meteorológica de muy corto alcance (unos 50 km). Estos radares se emplean para estudios de desarrollo de nubes debido a que pueden detectar pequeñas partículas de agua y también se utilizan para detectar precipitaciones ligeras tales como nieve. Además, debido a su reducido tamaño, los radares meteorológicos en la banda X se utilizan a menudo como unidades portátiles móviles. También se utilizan para detectar variaciones del viento, en particular para fines aeronáuticos (cizalladuras, vórtices, ...).

### 4.2.9.2 Atenuación

Cuando se propagan por la atmósfera, las ondas electromagnéticas son atenuadas por el vapor de agua, la absorción gaseosa, las nubes y las precipitaciones (Fabry, 2015). La mayor atenuación se debe con diferencia a las precipitaciones y, especialmente, las lluvias intensas. Las leyes físicas de la propagación determinan que la tasa de atenuación (en dB por unidad de longitud) en la banda C (5,0 cm) es entre 6 y 8 veces superior a la que se produce en la banda S (10,0 cm) en función de la intensidad de la lluvia (Bean y Dutton, 1966, Burrows y Attwood, 1949). La atenuación plantea un problema mucho mayor en la banda X, con tasas de atenuación más de 100 veces superiores a las que se producen en la banda S y más de 15 veces superiores a las correspondientes a la banda C para intensidades de lluvia de 6 mm/h.

Las grandes consecuencias de la atenuación a longitudes de onda más cortas están bien documentadas en diversas publicaciones. En los años 80 el *National Severe Storms Laboratory* efectuó comparaciones directas de calidad de funcionamiento entre radares de 5 y 10 cm, que demostraron que la utilización de longitudes de onda de 5 cm con lluvias intensas podría impactar seriamente las previsiones de grandes tormentas y las operaciones de alerta (Allen, 1981).

La corrección de la atenuación se vuelve problemática con longitudes de onda más cortas porque es necesario medir la potencia con mucha precisión (Hitschfeld, 1954). Los requisitos de precisión de la calibración de la reflectividad necesarios para las bandas C y X con miras a soportar los algoritmos de corrección de la atenuación exceden de los requisitos actuales para el programa de radar de la próxima generación (NEXRAD, *Next Generation Radar*) de Estados Unidos y son difíciles de obtener en la práctica. La introducción de la polarimetría en los radares meteorológicos ha cambiado considerablemente la situación porque la fase diferencial ofrece estimaciones de la atenuación que no dependen de la precisión de calibración de la reflectividad.

Un problema relativamente conexo de la atenuación crea la necesidad de que los radares meteorológicos empleen una polarización lineal. Al inicio del despliegue del radar de vigilancia meteorológica (*NEXRAD Weather Surveillance Radar*) – 1988 Doppler (WSR-88D) en la banda S, el sistema funcionaba con polarización elíptica, a fin de obtener un diseño eficiente del equipo de transmisión y recepción de la señal RF, pero los administradores del sistema descubrieron rápidamente que la despolarización con lluvias intensas impactaba gravemente las operaciones, y modificaron el radar para adoptar una polarización horizontal lineal (Sirmans, 1993). Dado que la polarización es un factor que interviene en la sensibilidad a las interferencias, debería conservarse la capacidad actual de utilizar la polarización lineal (horizontal y/o vertical).

### 4.2.9.3 Estimaciones del máximo alcance y velocidad sin ambigüedad

La elección de la frecuencia del radar meteorológico define asimismo las características de funcionamiento de la máxima velocidad de viento medible y la distancia máxima. En los radares de impulsos, el tiempo entre impulsos determina el máximo alcance<sup>5</sup> sin ambigüedad del radar. El reflejo de un impulso debe volver al receptor antes de la transmisión del siguiente impulso, de lo contrario el impulso recibido resulta ambiguo. En los sistemas de radares Doppler, la frecuencia de repetición de impulsos (PRF, *pulse repetition frequency*) determina el máximo alcance y velocidad sin ambigüedad que el radar es capaz de medir (Doviak, 1979). El diseño del radar queda limitado por el producto alcance-velocidad sin ambigüedad, que es una constante dada por:

$$R_m \cdot V_m = c \frac{\lambda}{8} \quad (4-11)$$

<sup>5</sup> El máximo alcance sin ambigüedad es la mayor distancia a la que puede desplazarse un impulso transmitido y volver al radar antes de que se transmita el siguiente impulso. En otras palabras, el máximo alcance sin ambigüedad es la máxima distancia que la energía del radar puede desplazarse en un viaje de ida y vuelta entre impulsos y seguir produciendo información fiable.

donde:

$R_m$ : alcance del radar sin ambigüedad (máxima distancia a la que el radar puede efectuar una medición)

$V_m$ : velocidad del radar sin ambigüedad (máxima velocidad que el radar puede medir)

$c$ : velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s)

$\lambda$ : longitud de onda de la señal del radar.

La longitud de onda de la señal, determinada por la frecuencia del radar, es el único parámetro que queda a discreción del diseñador del radar a fin de maximizar la medición del máximo alcance y la máxima velocidad del radar. Una reducción de longitud de onda exige disminuir la capacidad de medición del alcance eficaz, de la velocidad eficaz o una combinación de ambas en la misma magnitud que el incremento de frecuencia. Para limitar el efecto de ambigüedad y mejorar el producto alcance-velocidad, los modernos radares meteorológicos, en particular los de banda C, a menudo utilizan distintos esquemas de emisión que combinan diferentes PRF (véase el punto 4.2.4).

Se proporcionan valores para tecnologías distintas: los magnetrones, los klystrones y TOP, estos últimos pueden entregar impulsos de emisión corta caracterizados por un espectro de emisión más ancho. Algunos magnetrones muestran una desviación de frecuencia inferior a 1 MHz a lo largo de un gran intervalo de temperatura ambiente. Los radares de exploración rápida consumen una gran cantidad de espectro, 10 MHz por ejemplo, debido a la utilización de compresión de impulsos.

Incluso con las longitudes de onda más largas de la banda S puede ser difícil obtener una calidad de funcionamiento aceptable del radar a grandes distancias y velocidades. Por ejemplo, en el programa NEXRAD de EE.UU. se emplean numerosos métodos de mitigación tales como exploraciones múltiples con la misma elevación utilizando PRF diferentes y codificación de fase sistemática. Esos problemas son mucho más difíciles con longitudes de onda más cortas.

#### 4.2.9.4 Coherencia del eco

El límite de la velocidad inambigua (frecuencia de Nyquist) viene determinado por la relación entre PRF y longitud de onda. El cointervalo de Nyquist (gama de velocidades inambiguas) es directamente proporcional a la longitud de onda. La ecuación pertinente es:

$$V_a = \frac{\lambda \cdot PRF}{4}$$

Por consiguiente, para una PRF determinada, la longitud de onda establece el cointervalo de Nyquist, que a su vez limita la precisión de las estimaciones Doppler de anchura del espectro. Cuando la anchura del espectro se vuelve grande con respecto al cointervalo de Nyquist, las muestras de radar se vuelven incoherentes entre impulsos y la precisión de las estimaciones disminuye. La anchura del espectro puede aumentar (ensanchamiento espectral) y convertirse en una gran porción del espectro debido a diversos factores tales como turbulencias, cizallamiento y velocidades de caída (Fabry, 2015, sección 5.2). Si la anchura del espectro excede en más de aproximadamente  $(2\pi)^{-1}$  del cointervalo de Nyquist, la variación de la estimación de velocidad Doppler aumenta exponencialmente (Doviak, 1978).

Dado que los efectos de las turbulencias y el cizallamiento aumentan a medida que aumenta el volumen de muestreo del radar, la anchura del espectro es función de la anchura de banda y el alcance efectivos del radar. El «alcance de coherencia» puede definirse como el alcance máximo al cual se pueden obtener estimaciones Doppler de calidad aceptable. Para una anchura de banda determinada son preferibles longitudes de onda más largas (como 10 cm, banda S).

#### **4.2.9.5 Efectos de la resonancia – mediciones de intensidad cuantitativas**

La sección transversal efectiva de la retrodispersión de partículas esféricas depende notablemente de la longitud de onda de la señal incidente y del diámetro de la esfera (Rheinstein, 1968). Para obtener estimaciones precisas de la reflectividad, que son una medida de las secciones transversales de la retrodispersión, la potencia debe ser una función lineal del tamaño de la gota. Por consiguiente, debe evitarse la retrodispersión del radar que se produce en la región de Rayleigh y la región de Mie, que es sumamente no lineal, para diámetros de gotas de lluvia normalmente esperados (Fabry, 2015). Los efectos de la resonancia, sumados a la atenuación, pueden tener efectos negativos en las estimaciones de variables polarimétricas (Zrníc, 2000). Según Zrníc, con una longitud de onda de 5 cm se produce una resonancia con gotas mayores de unos 5 mm y la variable polarimétrica presenta un comportamiento no lineal (no monótono), lo que imposibilita la obtención de estimaciones cuantitativas precisas. Los efectos en el coeficiente de correlación sean relativamente obvios en la banda C, en particular para valores de reflectividad superiores a 30 dBz (Ryzhkov, 2005).

La incertidumbre de la relación entre el diámetro de la gota y la sección transversal de la retrodispersión en la región Mie puede impedir realizar estimaciones de reflectividad aceptables para longitudes de onda más cortas. En las longitudes de onda en las que se produce atenuación, pequeños errores en las constantes de calibración del radar causan grandes errores en las tasas de pluviosidad estimadas (Hitschfeld, 1954).

#### **4.2.9.6 Conclusiones**

La elección de la gama de frecuencias para los radares meteorológicos está relacionada con la distancia de cobertura requerida. Si se requiere una gran distancia de cobertura, o en zonas geográficas donde las lluvias suelen ser intensas, la banda S permite estimaciones de mayor calidad para parámetros basados en la intensidad y para estimaciones Doppler. En otras zonas geográficas o a distancias más cortas, los radares en banda C y banda X son más adecuados, respectivamente. Otras consideraciones importantes son la incapacidad de mitigar suficientemente ambigüedades de distancia y velocidad debidas a las distancias más cortas del primer trayecto que necesitan las PRF que son suficientemente elevadas para permitir el procesamiento de estimaciones Doppler precisas. Otras imprecisiones de datos se deben a efectos de resonancia (dispersión de Mie comparada con la de Rayleigh) que dan relaciones no lineales entre la potencia devuelta (señal de retrodispersión) y las distribuciones de tamaño de gotas de la precipitación. Esto impide estimaciones precisas de la intensidad de la lluvia y degrada seriamente los algoritmos de identificación de partículas.

#### **4.2.10 Vulnerabilidad de los radares meteorológicos**

Un radar meteorológico determina la distancia a los blancos midiendo el tiempo necesario para que la señal emitida viaje desde el transmisor al blanco y vuelva al emplazamiento del radar. El tiempo del recorrido es función de la longitud del trayecto y la precisión con la que puede medirse depende de manera crítica de los tiempos de subida y bajada del impulso. El frente anterior o el posterior del impulso constituye la referencia de medición del tiempo de llegada del impulso reflejado, cuanto menos dure mayor será la exactitud posible de la medición.

Para que los tiempos de transición de los impulsos sean cortos se necesita linealidad de fase en los circuitos del transmisor y receptor en una banda de frecuencias relativamente ancha. La anchura de banda necesaria es aproximadamente proporcional al más corto de los dos tiempos de transición del impulso; si se intenta reducir la anchura de banda de la señal emitida (mediante filtrado adicional, etc.) más allá de lo necesario, se degrada la precisión del sistema. La anchura de banda necesaria suele sorprender a los profanos en sistemas de radar. La interferencia recibida en la anchura de banda necesaria degrada asimismo la calidad de funcionamiento.

Debe recordarse que aunque en la mayoría de las transmisiones radioeléctricas hay un único recorrido del trayecto entre antenas de características conocidas, la señal del radar debe recorrer dos veces el trayecto con un reflejo intermedio en objetos (gotas de lluvia, piedras de granizo o polvo arrastrado por el viento) que no han sido diseñados para este fin. Las señales recibidas resultantes son extremadamente débiles.

A pesar de que se utilizan frecuentemente potencias de transmisión elevadas y receptores muy sensibles, los radares son extremadamente vulnerables al ruido y a las interferencias.

### 4.2.10.1 Tipos de posible interferencia

La capacidad de los radares meteorológicos de determinar con precisión el estado actual de las condiciones atmosféricas puede degradarse debido a varias formas de interferencia que podrían limitar o, en el peor de los casos, incluso anular la capacidad de los radares para detectar la velocidad y dirección del viento a diversas altitudes, cuantificar de manera pertinente intensidades y acumulaciones de lluvia, así como localizar y realizar el seguimiento de huracanes, tifones, tornados, temporales y otros tipos de fenómenos relativos a las tormentas. Debido a la sensibilidad de los radares, las señales interferentes pueden disminuir significativamente el comportamiento del radar meteorológico. Por consiguiente, es importante identificar los tipos de interferencia que pueden degradar las capacidades operacionales de los radares.

Las señales intrusivas constantes, variables en el tiempo y de tipo impulsivo son los tipos fundamentales de interferencia que pueden experimentar los radares meteorológicos. Una vez identificadas estas formas de interferencia, puede establecerse el máximo nivel de interferencia que pueden soportar los sistemas de radares meteorológicos antes de comprometer su capacidad de previsión.

Los niveles de los criterios de protección de los radares meteorológicos indicados en la Recomendación UIT-R M.1849-1 tienen un valor máximo de  $I/N = -10$  dB en el caso de interferencia constante.

### 4.2.10.2 Repercusión de una interferencia constante

#### 4.2.10.2.1 Cobertura geográfica

La interferencia constante puede disminuir el alcance operacional del radar, lo que limita la zona geográfica de cobertura debido al correspondiente incremento del ruido.

Un criterio de protección de  $I/N = -10$  dB corresponde a un incremento de ruido o energía de 0,5 dB.

Partiendo del principio de que los radares se calibran a fin de que coincidan con el nivel de ruido del receptor (es decir, unos  $-113$  dBm) para un nivel de reflectividad 0 dBz a 100 km, un incremento del ruido cambia las condiciones nominales del radar, disminuyendo su alcance operacional.

La cobertura actual de los radares meteorológicos típicos en banda C se extiende aproximadamente hasta 200 km. El Cuadro 4-3 resume las pérdidas de alcance y cobertura a medida que aumenta la interferencia y el ruido.

CUADRO 4-3

#### Pérdidas de alcance y cobertura

Incremento de ruido (dB)	$I/N$ correspondiente (dB)	Pérdidas de cobertura (km)	Pérdida de cobertura (% con respecto a la superficie total)
0,5	-10	11	11%
1	-6	22	21%
2	-2,3	42	38%
3	0	59	50%
4	1,8	75	61%
5	3,3	88	69%
6	4,7	100	75%
7	6	111	80%
8	7,3	121	84%
9	8,4	130	88%
10	9,5	137	90%

#### 4.2.10.2.2 Intensidad de lluvia

La interferencia constante también provoca un incremento de la energía recibida por el radar que puede repercutir en la medición de la reflectividad asociada con diversos tipos de precipitación (por ejemplo, lluvia, nieve y granizo). El Cuadro 4-4 resume el porcentaje de incremento para varios eventos de precipitación a medida que aumenta la interferencia (ruido).

Siguiendo la descripción realizada en el § 4.1.2, la tasa de precipitación correspondiente a cierto nivel de reflectividad (dB) viene dada por:

$$z = AR^B$$

siendo:

- $z$ : reflectividad
- $A$ : constante de dispersión
- $B$ : factor multiplicador

y

$$z = 10 \log z \text{ (dBz)}$$

siendo:

dBz: reflectividad (dB).

Reordenando los términos y resolviendo para R se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left( \frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1.6}\right)}$$

Suponiendo un incremento de energía constante,  $C$ , la intensidad de lluvia resultante es:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left( \frac{10^{\left(\frac{\text{dBz} + C}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1.6}\right)}$$

El incremento de intensidad de lluvia en porcentaje es, por lo tanto, una constante que viene dada por:

$$p(R_{(\text{mm/h})}) = 100 \times \left( 10^{\left(\frac{C}{16}\right)} - 1 \right)$$

En el Cuadro 4-4 aparecen las constantes de dispersión típica y los factores multiplicadores para diversos tipos de precipitación<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Las constantes de dispersión y los factores multiplicadores para la lluvia estratiforme, la lluvia de convección, la nieve y el granizo, se han obtenido a partir de mediciones.

CUADRO 4-4

**Constantes de dispersión y factores multiplicadores  
para distintos eventos de precipitación**

Variables	Lluvia estratiforme	Lluvia de convección	Nieve	Granizo
Constante de dispersión (A)	200	500	2 000	2 000
Factor multiplicador (B)	1,6	1,5	2	1,29

El Cuadro 4-5 resume el porcentaje de incremento de lluvia para varios eventos de precipitación.

CUADRO 4-5

**Aumento de la intensidad de precipitación**

Incremento de ruido (dB)	I/N correspondiente (dB)	Incremento de la intensidad de lluvia estratiforme (%)	Incremento de la tasa de lluvia de convección (%)	Incremento de la intensidad de nieve (%)	Incremento de la intensidad de granizo (%)
0,5	-10	7,5	8,0	5,9	9,3
1	-6	15,5	16,6	12,2	19,5
2	-2,3	33,4	35,9	25,9	42,9
3	0	54,0	58,5	41,3	70,8
4	1,8	77,8	84,8	58,5	104,2
5	3,3	105,4	115,4	77,8	144,1
6	4,7	137,1	151,2	99,5	191,8
7	6	173,8	192,9	123,9	248,8
8	7,3	216,2	241,5	151,2	317
9	8,4	265,2	298,1	181,8	398,5
10	9,5	321,7	364,2	216,2	495,9

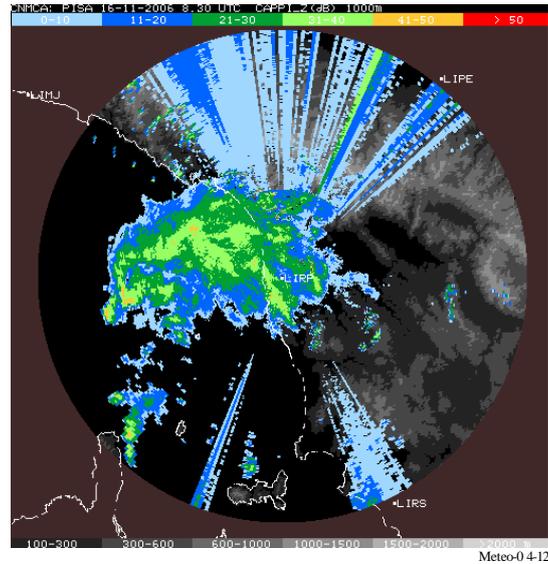
Estos cálculos demuestran que, independientemente del valor de la intensidad de lluvia y del tipo de precipitación, el porcentaje de sobrestimación correspondiente a un incremento de energía constante determinado también es constante y, por consiguiente, no puede despreciarse.

Además, considerando el cálculo de reflectividad para un determinado píxel basado en la media (dBz), sobre todas las estimaciones y la desviación típica correspondiente, conviene señalar que un incremento de la interferencia no modificaría la capacidad de los radares de detectar células de lluvia (es decir, una medición no considerada como una célula de lluvia seguiría sin ser considerada como tal célula) sino que tendría solamente repercusiones en la intensidad de lluvia medida.

También es interesante señalar que para las pérdidas de cobertura o una sobrestimación de la intensidad de lluvia, el actual criterio de protección acordado de  $I/N = -10$  dB representa una degradación en el comportamiento del radar en la gama del 7 al 11%, comparable a los porcentajes de degradación de comportamiento generalmente admitidos para todos los servicios de radiocomunicaciones.

En la Figura 4-12 puede observarse un ejemplo de la repercusión de una interferencia constante sobre un radar en modo precipitación. Es importante destacar que aunque sea una interferencia constante, la variación en la repercusión se debe al giro de la antena y la máxima interferencia (de color verde en la imagen) se produce en el acimut de la fuente de interferencia.

FIGURA 4-12

**Ejemplo de interferencia en modo precipitación de un radar meteorológico****4.2.10.2.3 Medición del viento**

En el caso de mediciones Doppler, la evaluación de la repercusión de una interferencia constante determinada es algo diferente y depende en particular de la manera en que la fase de la señal interferente modifique la fase de la señal deseada influenciando de esa forma la medición del viento correspondiente.

Esta última hipótesis no es evidentemente trivial de determinar y dependerá de la señal y/o del medio ambiente. No obstante, se propone considerar las diferentes situaciones de un modo teórico:

- *Caso 1* – Si la fase de la señal interferente detectada por el radar es aleatoria, ello significa que el vector resultante sería estadísticamente nulo, cualquiera que sea su nivel. Por tanto, teóricamente no habría ninguna repercusión en las mediciones del viento.
- *Caso 2* – Por el contrario, si la fase detectada no es aleatoria y es casi constante, daría lugar a un vector constante con un cierto módulo y la repercusión en la medición del viento dependerá tanto de la fase como del módulo de dicho vector. Sin embargo, determinar dicha repercusión, incluso para un nivel de referencia constante, probablemente no será una tarea fácil y, en consecuencia, no se aborda en este texto.

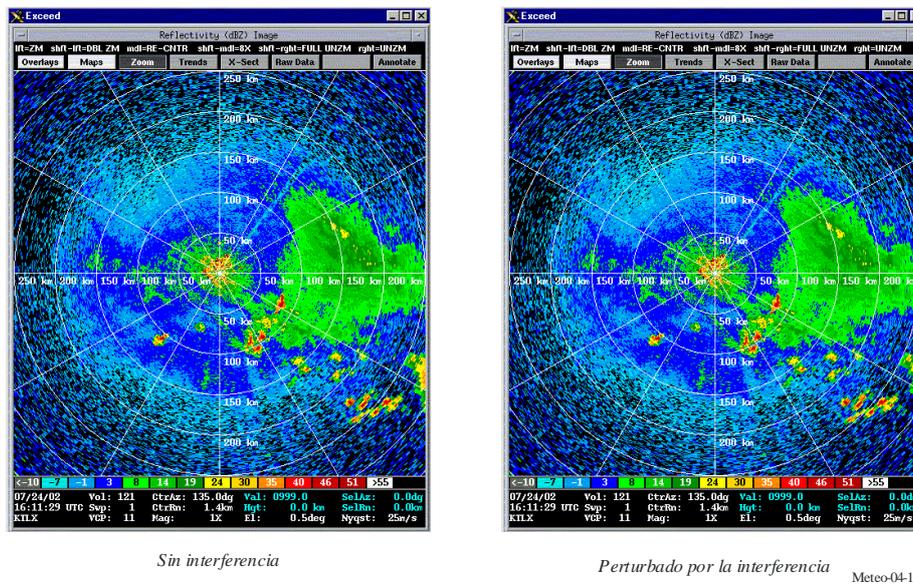
Además, puede suponerse que cuando el nivel de interferencia es muy inferior al de la señal deseada, la fase de esta última no resulta modificada mientras que, por el contrario, si la señal interferente es mucho más elevada, la fase detectada por el radar será la fase de la señal interferente. En esta última situación, seguirá siendo válido lo indicado en los Casos 1 y 2 anteriores. Entre estas dos situaciones, es decir cuando los niveles de las señales interferente y deseada son similares, parece bastante difícil determinar qué señal controlará la detección de fase.

**4.2.10.3 Repercusión de la interferencia impulsiva**

La interferencia impulsiva puede tener una influencia significativa sobre los datos de reflectividad y puede dar lugar a un retorno de datos de los que no puede extraerse con fiabilidad una imagen de los blancos en la atmósfera. Un ejemplo de esta situación puede verse en la Figura 4-13.

FIGURA 4-13

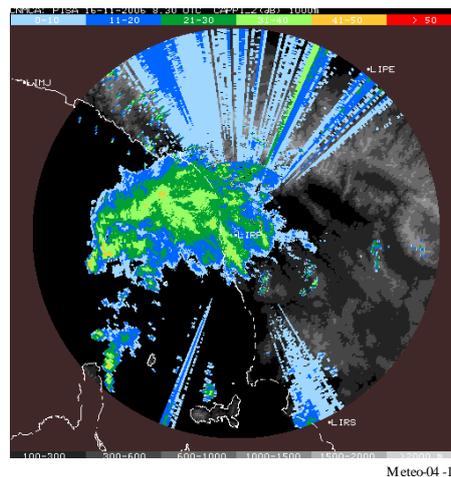
**Comparación entre los modos de precipitación de un radar meteorológico sin interferencia y perturbados por la interferencia**



En la Figura 4-14 aparece un ejemplo adicional de interferencia en un radar meteorológico provocada por un solo transmisor de baja potencia en interiores.

FIGURA 4-14

**Interferencia en un radar meteorológico (modo precipitación)**



**4.2.10.4 Interferencia procedente de parques eólicos**

En los últimos años, cada vez se construyen turbinas de viento (aerogeneradores) más grandes y el número de instalaciones eólicas típicas (o parques eólicos que cuentan numerosos aerogeneradores) aumenta espectacularmente. Los aerogeneradores y los parques eólicos, incluso a muy largas distancias, presentan un elevado potencial de degradación de los datos meteorológicos a lo largo de zonas muy amplias y tienen una repercusión muy significativa en las predicciones meteorológicas a largo, medio y corto plazo.

A fin de lograr predicciones meteorológicas precisas, los radares meteorológicos se diseñan para que estén dirigidos a una banda de altitud relativamente estrecha. Debido a la sensibilidad de los radares, si se instalan

aerogeneradores en línea de visibilidad directa con radares meteorológicos, pueden bloquear la propagación de las señales del radar causando retornos del eco de reflectividad y produciendo ecos de radar inducidos por la turbulencia. Estos mecanismos de interferencia pueden dar lugar a estimaciones del radar falsas relativas a la acumulación de precipitaciones, falsas alarmas de tornados y mesociclos, identificación errónea de las características de las tormentas e identificación incorrecta de las células de las tormentas. Además, los mecanismos de interferencia pueden degradar el funcionamiento del radar e influir negativamente en las predicciones meteorológicas y funciones de aviso. Existen tres mecanismos a través de los cuales puede degradarse esta calidad de funcionamiento: enmascaramiento, eco y retrodispersión.

#### 4.2.10.4.1 Enmascaramiento

Todo obstáculo geográfico o estructura que se encuentre entre el radar y el blanco provocará un apantallamiento o efecto de enmascaramiento. Es posible que, dependiendo de su tamaño, los aerogeneradores puedan causar efectos de sombra. Cabe esperar que estos efectos varíen según las dimensiones del aerogenerador, del tipo de radar transmisor y de la orientación del aerogenerador con respecto al radar (altitud, ángulo de las aspas, velocidad de rotación y posición relativa del radar con respecto a la turbina).

#### 4.2.10.4.2 Eco

Los retornos del radar pueden ser recibidos por cualquier superficie reflectora del radar. En algunas zonas geográficas, o bajo condiciones meteorológicas particulares, el comportamiento del radar puede resultar muy afectado por retornos no deseados que pueden enmascarar los retornos de interés. Tales señales de retorno no deseadas se conocen con el nombre de eco del radar. Para realizar predicciones meteorológicas, los aerogeneradores o las turbinas en las proximidades de un radar meteorológico pueden causar problemas operacionales.

Las señales de ecos en el suelo presentan una gran reflectividad, un desplazamiento Doppler casi nulo y una pequeña anchura de espectro, y están permanentemente localizadas. En comparación con los ecos en el suelo que aparecen normalmente, la interferencia causada por los aerogeneradores representan un reto mucho más difícil de abordar. Las reflexiones directas pueden recibirse tanto desde la torre (estacionaria) como desde las aspas (no estacionarias). Al igual que el eco del suelo, la señal del eco del aerogenerador (WTC, *wind turbine clutter*) seguirá teniendo una reflectividad significativamente elevada, con una posible modulación debido al giro de las aspas lo que puede causar una variación sistemática en la sección transversal del radar.

El desplazamiento Doppler resultará afectado por varios factores, incluida la velocidad de rotación de las aspas y la orientación del rotor con respecto al haz del radar. Las velocidades Doppler deben ser máximas cuando el rotor está orientado a 90 grados con respecto a la línea de visibilidad del radar y casi cero cuando el rotor está frente al radar o detrás de él. Como el volumen de resolución del radar probablemente englobará toda la estructura del aerogenerador, cabe esperar que la anchura de espectro aumente significativamente. Ello se debe al giro de las aspas en la misma dirección y en dirección opuesta del radar. Si existen múltiples turbinas dentro de un volumen de resolución se exacerbará este efecto.

#### 4.2.10.4.3 Energía retrodispersada por remolinos turbulentos

Además de las señales WTC causadas por reflexiones procedentes de aerogeneradores reales, puede observarse una retrodispersión de energía provocada por remolinos turbulentos procedentes del parque eólico. Cabe esperar que estos ecos presenten características similares a la retrodispersión en cielo despejado causada por discontinuidades en el índice de refracción en la escala de Bragg del radar. Estos ecos se desplazarían con el viento y probablemente tendrían una reflectividad mucho menor en comparación con las reflexiones directas procedentes de las turbinas. No obstante podrían incrementar significativamente la zona de cobertura del radar afectada por WTC y por consiguiente exacerbar el problema.

#### 4.2.10.4.4 Ejemplos de eco del aerogenerador

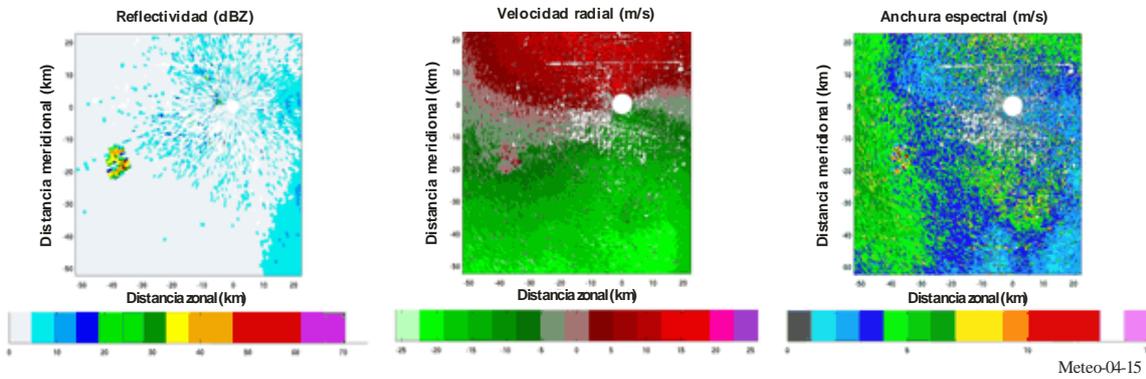
En la Figura 4-15 aparecen dos ejemplos distintos de interferencia producida por parques eólicos<sup>7</sup> [Palmer e Isom, 2006]. Como cabía esperar, la reflectividad presenta grandes valores cerca de 45 dB<sub>Z</sub> con anchuras de espectro esporádicamente elevadas de más de 10 m/s. La región relativamente pequeña de elevada reflectividad

<sup>7</sup> Los parques eólicos son agrupaciones de turbinas eólicas (aerogeneradores) utilizadas para generar energía eléctrica.

situada hacia el sudoeste del radar es claramente visible y coincide con la ubicación de un parque eólico que se encuentra a unos 45 km del emplazamiento de los radares meteorológicos.

FIGURA 4-15

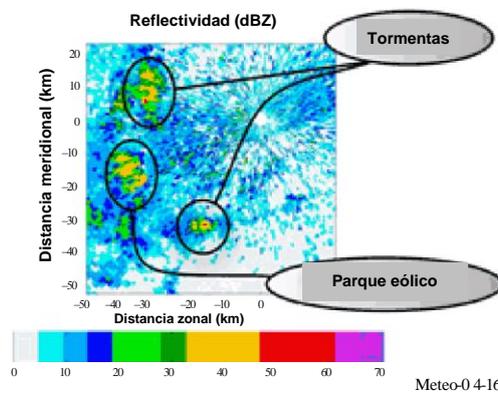
**Ejemplos de interferencia causada por un parque eólico a un radar meteorológico en condiciones de cielo despejado**



La Figura 4-16 muestra ese mismo parque eólico durante una tormenta.

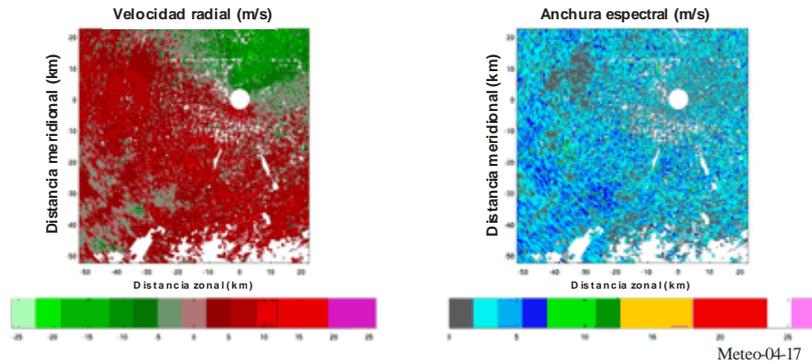
FIGURA 4-16

**Ejemplo de interferencia causada por un parque eólico y su repercusión en la reflectividad durante un incidente aislado de tormenta**



Sin previo conocimiento, sería extremadamente difícil distinguir entre el WTC y la tormenta. Como las aspas giran hacia el radar y alejándose del radar, cabe esperar una velocidad Doppler media casi nula. Evidentemente, las anchuras de espectro elevadas reducirán la precisión de las estimaciones de velocidad Doppler como ilustra la Figura 4-17 para pequeñas desviaciones con respecto al cero.

FIGURA 4-17

**Ejemplos de estimaciones de datos de velocidad Doppler durante una tormenta****4.2.10.4.5 Repercusión del WTC en el funcionamiento de un radar meteorológico y en la precisión de las predicciones meteorológicas**

Los estudios de campo que se han llevado a cabo recientemente ilustran la repercusión del WTC sobre los radares meteorológicos. Estos estudios han demostrado que los parques eólicos pueden tener un efecto muy significativo en los radares meteorológicos y degradar la precisión con que se detectan fenómenos meteorológicos importantes.

Estos análisis han demostrado claramente que el eco producido por un aerogenerador estará presente en un gran sector (varias decenas de grados) comparado con la dirección del aerogenerador, incluso a grandes distancias. Por consiguiente, no puede despreciarse la repercusión de estos aerogeneradores sobre el funcionamiento de reflectividad de los radares meteorológicos.

En particular, los análisis han puesto en evidencia que la repercusión de un solo aerogenerador sobre los radares meteorológicos funcionando en modo Doppler es muy significativa incluso a distancias de varias decenas de kilómetros. También puede señalarse que a distancias inferiores a 10 km, todos los datos del radar serán erróneos para cualquier acimut, incluso a 180° del sector en el que se encuentra el parque eólico.

Es preciso tomar algunas medidas para reducir el WTC con objeto de proteger los radares meteorológicos contra la interferencia perjudicial causada por los parques eólicos. Antes de llegar a conclusiones definitivas sobre los métodos de actuación para disminuir el WTC, deben realizarse estudios adicionales sobre este fenómeno a fin de comprender la magnitud e influencia del WTC sobre los radares meteorológicos. Una vez definidas, puede que sea necesario elaborar métodos para reducir el WTC teniendo en cuenta el crecimiento esperado de los sistemas de generación de energía eólica.

A la espera de los resultados de los estudios en curso sobre reducción de la interferencia WTC causada a los radares meteorológicos, la solución actual para evitar o limitar la repercusión de los parques eólicos consiste en garantizar unas distancias de separación determinadas entre los dos sistemas. Por ejemplo, algunos países europeos están considerando actualmente las siguientes recomendaciones:

- 1) No instalar ningún aerogenerador a una distancia de la antena del radar inferior a:
  - 5 km para radares en la banda C
  - 10 km para radares en la banda S.
- 2) Que los proyectos de parques eólicos se sometan a un estudio de posibles repercusiones en distancias inferiores a:
  - 20 km para radares en la banda C
  - 30 km para radares en la banda S.

**4.2.11 Vulnerabilidad de los sistemas que comparten espectro con radares meteorológicos**

Como se ha indicado anteriormente, la potencia del transmisor y la ganancia de antena de los radares meteorológicos suelen ser lo suficientemente elevadas para compensar la mayor longitud de los trayectos

(normalmente en torno a 100 dBW de p.i.r.e. de cresta). Estas características tienden a aumentar la distancia en la que el radar puede interferir a sistemas que funcionan en la misma frecuencia (respetando la anchura del canal del radar). También se han dado casos en los que el radar y los enlaces fijos de microondas, que han coexistido durante algún tiempo, resultaron incompatibles cuando el sistema de microondas se actualizó dejando de utilizar equipos analógicos para utilizar equipos digitales que presentan una mayor sensibilidad a la interferencia impulsiva.

#### 4.2.12 Futuras tendencias

Se está mejorando constantemente el hardware de los sistemas de los radares meteorológicos de varias administraciones. La siguiente mejora será el radar polarimétrico que añade polarización vertical a las actuales ondas del radar que emplean polarización horizontal.

También se están aplicando técnicas adicionales para mejorar el comportamiento de los radares meteorológicos. Entre estas técnicas cabe citar varios algoritmos para resolver las ambigüedades de alcance/velocidad, aumentar la velocidad y adquisición de datos, reducir los efectos de las señales parásitas, disminuir los ecos parásitos y procesar de manera más eficaz las señales a fin de proporcionar estimaciones meteorológicas lo más precisas posibles. Otros trabajos incluyen la utilización combinada de radares meteorológicos y de perfil del viento. También se están estudiando los efectos del rayo y sus peligros para determinar si puede predecirse su inicio y terminación.

Los investigadores empezarán a adaptar en breve la tecnología de radares con sistemas controlados por fase para su utilización en aplicaciones de supervisión del clima. El sistema controlado por fase sustituirá a las antenas parabólicas orientadas de forma mecánica mediante un sistema de antenas orientadas electrónicamente. Este cambio permitirá realizar estrategias de exploración más flexibles y actualizaciones más rápidas de las condiciones meteorológicas cambiantes. Las primeras pruebas sobre sistemas de radares controlados por fase han sido muy prometedoras. La tecnología de sistema controlado por fase aumentará la comprensión básica de la evolución de las tormentas, lo que a su vez facilitará la creación de modelos informáticos mejorados, predicciones más precisas y alertas más tempranas. Además, esta tecnología presenta la posibilidad de incrementar el tiempo de antelación con que puede avisarse de la llegada de un tornado mucho más allá de la actual media de 13 minutos. Estos sistemas controlados por fase no exigen ningún cambio en la potencia de salida del transmisor ni en los requisitos de espectro de los actuales sistemas de antenas. Las mejoras del sistema se implementan de forma más económica mejorando los subsistemas de procesamiento del receptor y la señal. Aunque no se espera que puedan implementarse estos sistemas controlados por fase antes de los próximos diez años, existe la posibilidad de que la versión mejorada de este sistema (si se implementa) no utilice el transmisor existente que se sustituirá por módulos distribuidos de transmisión/recepción en el sistema controlado por fase.

Existe la posibilidad de instalar un CASA (*Center for collaborative adaptive sensing of the atmosphere*, Centro para la teledetección adaptativa conjunta de la atmósfera) basado en los sistemas de radar meteorológico en banda X en la banda de 8 000 MHz a 12 000 MHz del espectro de frecuencias. La Fundación Nacional de Ciencias estableció un nuevo centro de investigación de ingeniería para la detección adaptativa conjunta de la atmósfera (CASA) en septiembre de 2003 a fin de desarrollar adaptadores pequeños y de bajo coste para la teledetección de alta resolución de la atmósfera inferior. Las condiciones meteorológicas en la troposfera inferior están extremadamente submuestreadas lo que impide realizar predicciones y establecer modelos en la región donde se desarrollan las tormentas. Los radares CASA de alta densidad espacial tendrán la posibilidad de detectar fenómenos meteorológicos evolutivos en la región de la atmósfera inferior que se encuentran a menudo por debajo de la actual cobertura del radar Doppler operacional (es decir, los primeros tres kilómetros). Los radares CASA se instalarán en mástiles utilizados para telefonía celular u otra infraestructura existente con grandes capacidades de transmisión de datos. A diferencia de las actuales redes de radar preprogramadas, los radares CASA se comunicarán entre sí y adaptarán sus estrategias de detección en respuesta directa a las evoluciones meteorológicas y a las cambiantes necesidades de los usuarios. Estos datos del radar pueden incorporarse en modelos de predicción meteorológica numéricos para obtener una inicialización de datos más completa.

Debe realizarse un seguimiento de estas futuras tendencias y, a medida que evolucione la tecnología, tendrán repercusiones sobre cualquier futura estrategia para reducir la interferencia y sobre las definiciones de los criterios de protección.

### 4.3 Radares de perfil del viento (WPR)

Los radares de perfil del viento (WPR, *wind profiler radars*) se utilizan para obtener perfiles verticales del viento en emplazamientos desatendidos, y a veces remotos, detectando minúsculas fracciones de la potencia emitida devueltas por la turbulencia en atmósfera despejada. La Figura 4-18 es una fotografía de una instalación típica de un radar de perfil del viento.

FIGURA 4-18

#### Fotografía de una instalación de radar de perfil del viento



Una de las mayores ventajas de los radares de perfil del viento con respecto a otros sistemas de medición del viento es su capacidad de supervisar continuamente los campos de viento. Además, también pueden utilizarse para detectar las precipitaciones, medir las principales características en el campo de velocidad vertical (ondas de gravedad y corrientes ascendentes convectivas), estimar la intensidad de la turbulencia y medir la estabilidad atmosférica. Igualmente pueden proporcionar información detallada sobre el perfil vertical de la temperatura virtual de la atmósfera mediante la adición de un sistema de sondeo acústico por radar (RASS, *radar acoustic sounding system*)<sup>8</sup>.

#### 4.3.1 Requisitos de usuario

Una buena forma de examinar la repercusión de los requisitos del usuario en los parámetros de funcionamiento del radar de perfil del viento y en su diseño consiste en utilizar la siguiente ecuación simplificada basada en [Gossard y Strauch, 1983]:

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta_z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2}}{T_{sys}} \frac{C_n^2}{z^2} \quad (4-12)$$

donde:

- $\bar{P}_t$ : potencia media transmitida (W)
- $A_e$ : abertura eficaz (grados)
- $\Delta_z$ : resolución en altitud (m)
- $z$ : altitud (m)
- $\lambda$ : longitud de onda (m)

<sup>8</sup> El RASS utiliza una fuente acústica adaptada en frecuencia de manera que la longitud de onda de la señal acústica se adapta a la mitad de la longitud de onda electromagnética transmitida por el radar (Condición de Bragg). El RASS mide la velocidad de la onda acústica que depende de la temperatura. De esta forma el RASS proporciona medición a distancia de la temperatura virtual atmosférica.

- $t_{obs}$ : tiempo de observación (medio) (s)  
 $T_{sys}$ : temperatura de ruido del sistema (grados Kelvin)  
 $C_n^2$ : parámetro de estructura (adimensional).

Esta ecuación sólo es válida en el subintervalo inercial de la turbulencia atmosférica. De hecho, la estructura de la turbulencia atmosférica limita físicamente la gama de longitudes de onda utilizables del radar de perfil del viento a aproximadamente 10-0,2 m (30 a 1 500 MHz). Por debajo del límite inferior de este subintervalo inercial, la turbulencia es disipada rápidamente por viscosidad en calor. Por este motivo no se pueden utilizar longitudes de onda más cortas para el perfil del viento debido a la falta de fluctuaciones medibles del índice de refracción en muy pequeña escala.

El parámetro de estructura del índice de refracción es independiente de la frecuencia en la gama de longitudes de onda de Bragg pertinentes circunscrita por los límites del subintervalo inercial, aunque depende estrechamente de la altitud. La dependencia restante de la frecuencia radica esencialmente en el factor de la longitud de onda, y la temperatura de ruido de un sistema incluye una contribución importante de ruido cósmico para longitudes de ondas superiores a aproximadamente 1m.

El requisito de usuario de resolución temporal elevada disminuye la relación señal/ruido al reducir el tiempo medio. Este requisito puede satisfacerse si se selecciona una combinación de:

- abertura grande;
- potencia de cresta elevada y PRF elevada para aumentar la potencia media;
- gran longitud de onda; y
- funcionamiento en un intervalo de altitudes próximas al radar donde una PRF elevada no ocasione problemas de ambigüedad de distancia y donde la retrodispersión atmosférica y la inversa de la altitud al cuadrado no sean relativamente grandes.

El requisito de usuario de alta resolución vertical se satisface a costa de disminuir la relación señal/ruido por requerir impulsos cortos, reduciendo de este modo la potencia media. Una resolución vertical alta exige un gran ancho de banda. Este requisito puede satisfacerse no obstante mediante la combinación de:

- una gran abertura;
- una gran potencia de cresta con una PRF elevada y compresión de impulsos para aumentar la potencia media;
- una gran longitud de onda; y
- un intervalo de altitudes de funcionamiento próximas al radar para que la elevada PRF no ocasione problemas de ambigüedad en la determinación de distancias y para que la retrodispersión atmosférica y la inversa del cuadrado de la distancia sean relativamente grandes.

Obsérvese que la utilización de la compresión de impulsos (para aumentar la longitud del impulso) obliga a aumentar el umbral inferior de altura.

El requisito de usuario de obtener datos del viento a gran altitud se satisface a costa de disminuir la relación señal/ruido al disminuir la inversa del cuadrado de la altitud y, aunque no es evidente en la ecuación, al disminuir la altura del parámetro de estructura y la compresión de subintervalo inercial desde la longitud de onda más corta (frecuencia más alta) con el incremento de la altitud. Este requisito puede satisfacerse seleccionando una combinación de:

- gran abertura;
- potencia de cresta elevada y compresión de impulsos para aumentar la potencia media;
- gran longitud de onda; y
- grandes tiempos medios.

El requisito de usuario de funcionamiento fiable en todas las condiciones meteorológicas requiere una relación señal/ruido adecuada asimismo en condiciones de baja dispersión en la atmósfera. Son situaciones típicas los periodos invernales de baja humedad y los casos de baja turbulencia, es decir en el centro de corrientes en chorro a altitudes de 10-15 km. El requisito puede satisfacerse mediante la selección adecuada de:

- la banda de frecuencias;
- gran potencia media y abertura de la antena;
- mayor sensibilidad del receptor; y
- bajo nivel de interferencias y de ruido del sistema.

### 4.3.2 Aspectos operativos y de frecuencia

Las antenas de gran abertura y las potencias medias de emisión elevadas son caras. El coste de la antena y del amplificador de potencia de un radar de perfil del viento supone a menudo más de la mitad del coste total del sistema instalado. Por consiguiente, los avances tecnológicos en estas áreas son alternativas relativamente onerosas para la mejora de la calidad de funcionamiento.

No obstante, en el caso de la abertura de la antena hay otro factor a considerar que determina el tamaño mínimo. Los perfiladores multihaz funcionan mediante el recorrido sucesivo del haz en por lo menos tres direcciones independientes. Los sistemas actuales suelen utilizar dos o cuatro acimutes ortogonales con ángulos de elevación de 75° aproximadamente, que llegan a menudo a la vertical, para la adquisición de datos. Los diseños de antena más recientes ofrecen mucha más flexibilidad de orientación del haz. La anchura de haz de la antena debe ser lo suficientemente estrecha para delinear las múltiples posiciones del haz. Se pueden utilizar anchuras de haz a 3 dB de 5° a 10° correspondiendo a ganancias de antena de 33 dBi a 27 dBi, respectivamente. La ganancia determina la abertura eficaz de acuerdo con la ecuación (4-13):

$$A_e = 10^{G/10} \lambda^2 / 4\pi \quad (4-13)$$

No es posible escoger libremente las frecuencias de los radares de perfil del viento debido a la interferencia, a la congestión del espectro de frecuencias radioeléctricas y a la consiguiente reglamentación. Algunas aplicaciones que lo necesitaban, tales como el radar MU de Japón y los de los polígonos de lanzamientos orientales y occidentales de Estados Unidos de América, han exigido la utilización de radares muy grandes (aproximadamente 10 000 m<sup>2</sup>), potentes (250 kW de cresta o más, y 12,5 kW de media o más), de impulso corto (1 μs), operando cerca de 50 MHz. Los investigadores han utilizado asimismo otros perfiladores sin interferencias a frecuencias entre 40 y 70 MHz.

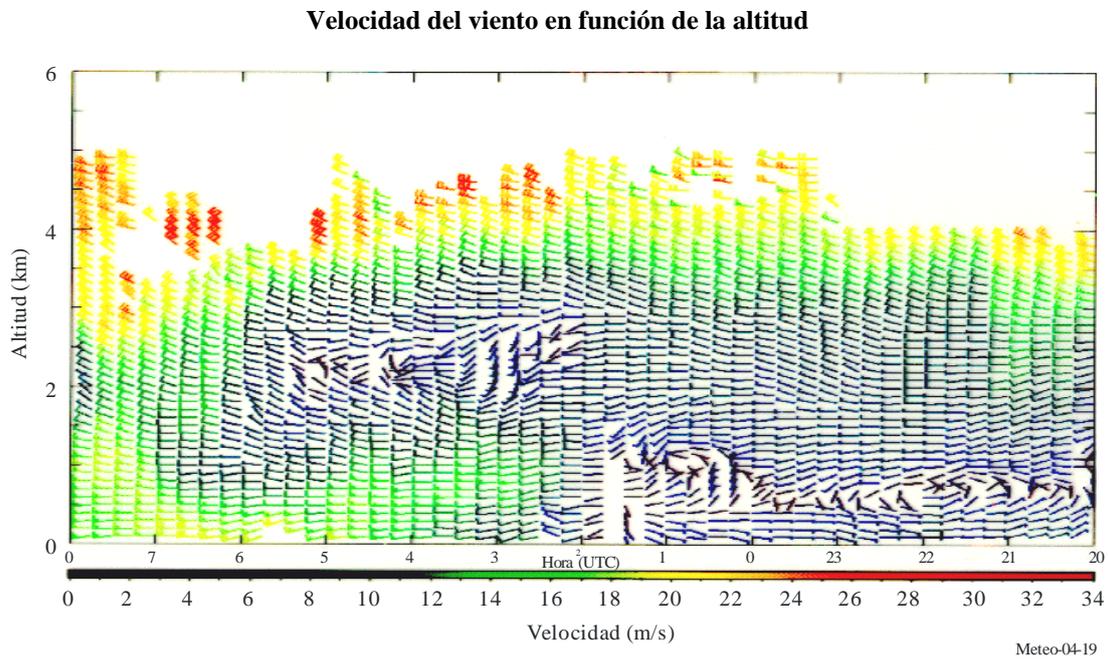
Los perfiladores que funcionan en el intervalo de 400-500 MHz se han diseñado para:

- medir los perfiles del viento entre 0,5-16 km aproximadamente por encima del radar con resoluciones verticales de 150-250 m a baja altitud y 300-1 000 m a alta altitud utilizando antenas de 32-34 dBi de ganancia aproximadamente;
- potencias medias de 500 W y 2 000 W aproximadamente para el sondeo a baja y gran altitud, respectivamente;
- funcionar con las anchuras de banda necesarias de menos de 2 MHz.

Aumentando la frecuencia operacional de un radar de perfil del viento se obtiene mayor grado de resolución en la medición a costa de disminuir las mediciones de altitud global. Por consiguiente, los radares de perfil del viento que funcionan a 915 MHz y en la banda 1 270-1 375 MHz se consideran típicamente como osciladores de capas limítrofes, capaces de medir el perfil del viento sólo en los primeros kilómetros de la atmósfera. Éstos funcionan con resoluciones verticales de unos 100 m utilizando antenas de ganancias inferiores a 30 dBi y potencias medias de unos 50 W aunque funcionando con las anchuras de banda necesarias de aproximadamente 2,5 MHz.

En la Figura 4-19 se representa, como ejemplo, el gráfico de la velocidad del viento en función de la altitud que se obtuvo de un sistema de radar de perfil del viento móvil funcionando a 924 MHz. La orientación de cada trazo representa la dirección del viento en función de la altitud (eje vertical) y el tiempo (eje horizontal), mientras que su color representa la velocidad del viento.

FIGURA 4-19



### 4.3.3 Requisitos espectrales actuales y futuros

Los radares de perfil del viento son sistemas situados en tierra con alturas de antena de uno o dos metros y haces verticales. La separación geográfica y el apantallamiento por el terreno constituyen protecciones eficaces contra las interferencias entre radares de perfil del viento. Por consiguiente, una red asequible de estos radares, separados por 50 km como mínimo en terreno llano – o menos en terreno más abrupto o con árboles – podría funcionar en la misma frecuencia. Por estos motivos, los radares de perfil del viento suelen ser compatibles con la mayoría de los servicios situados en tierra.

Es bien sabido que se necesitan anchuras de banda de 2 a 3 MHz en las proximidades de 400 MHz y de 2,5 MHz en las proximidades de 1 000 MHz o 1 300 MHz y puede suponerse que las disposiciones de la Resolución 217 (CMR-97), indicadas a continuación, son suficientes para satisfacer estos requisitos:

«... instar a las administraciones a que establezcan los radares de perfil del viento como sistemas del servicio de radiolocalización en las siguientes bandas, prestando la debida atención a la posible incompatibilidad con otros servicios y nociones a estaciones de estos servicios y, por tanto, teniendo debidamente en cuenta el principio de separación geográfica, en particular con respecto a los países vecinos y teniendo presente la categoría de cada uno de estos servicios:

- 46-68 MHz de conformidad con el número 5.162A
- 440-450 MHz
- 470-494 MHz de conformidad con el número 5.291A
- 904-928 MHz únicamente en la Región 2
- 1 270-1 295 MHz
- 1 300-1 375 MHz;»

«... que, en caso de que la incompatibilidad entre los radares de perfil del viento y otras aplicaciones radioeléctricas que funcionan en la banda 440-450 MHz o 470-494 MHz no pueda lograrse, podría considerarse la utilización de la banda 420-435 MHz o 438-440 MHz.»

#### 4.3.4 Aspectos de la compartición de los radares de perfil del viento

Las bandas atribuidas a los radares de perfil del viento por la CMR-97 se seleccionaron detenidamente para reducir al mínimo la probabilidad de interferencia entre los usuarios de estas bandas. Antes de identificar las bandas para los radares de perfil del viento se desarrolló una red experimental en la banda 400,15-406 MHz. Esta experiencia operacional demostró que el funcionamiento de los radares de perfil del viento en dicha banda 400,15-406 MHz provocaba interferencia al sistema COSPAS-SARSAT.

Por consiguiente, en la Resolución 217 (CMR-97) se identifica esta espectro para uso de WPR y se indica específicamente que los radares de perfil del viento no deben funcionar en la citada banda de 400,15-406 MHz. La existencia de esta red experimental proporcionó considerable información sobre la compatibilidad de los radares de perfil del viento con otros servicios. La densidad espectral de p.i.r.e. de estos radares en la dirección horizontal es aproximadamente:

- -18 dB(W/kHz) a la frecuencia central (449 MHz)
- -36 dB(W/kHz) a 0,5 MHz de distancia
- -55 dB(W/kHz) a 1 MHz de distancia
- -70 dB(W/kHz) a 2 MHz de distancia
- -79 dB(W/kHz) a 4 MHz de distancia.

Cuando estos valores tan bajos se combinan con antenas de pequeña altura y pérdidas del trayecto proporcionales a  $1/r^4$  para la propagación por la superficie de la Tierra, la separación geográfica resulta muy eficaz para la compartición.

Sin embargo, en el haz principal, la densidad espectral de p.i.r.e. es 57 dB mayor y, en consecuencia, los receptores a bordo de aviones y satélites están sujetos a niveles de interferencia muy superiores. Las pérdidas de trayecto proporcionales a  $1/r^2$  agravan el problema. Los esfuerzos subsiguientes para aminorar el problema con los WPR en la banda 400,15-406 MHz pusieron de manifiesto que la modulación utilizada por estos radares en 404 MHz tenía una repercusión significativa sobre sus características de compartición. Actualmente, los impulsos se codifican en fase para distinguir los dos o tres segmentos «chips» de cada impulso y poder obtener la compresión del impulso. Si no hubiera codificación adicional, el espectro de la emisión consistiría en líneas separadas por la PRF. Sin embargo, se impuso un miembro de secuencia de código de fase pseudoaleatorio de longitud 64 a cada impulso sucesivamente de modo que las líneas espectrales aparecen a intervalos de PRF/64 con las potencias de línea reducidas por un factor de 64. Así, los transmisores de los perfiladores se desconectaban bajo control mediante un ordenador cuando aparecía el satélite del COSPAS-SARSAT más de 41 grados por encima del horizonte del perfilador. (Como el número de estos satélites es pequeño, las pérdidas de datos del perfilador son despreciables.)

La codificación de fase aplicada a las emisiones del perfilador de 404 MHz deben «deshacerse» en el receptor. Por ello, la interferencia de otros sistemas distintos a los radares de perfil del viento aparece incoherente y como ruido para el radar perfilador. Por consiguiente, la mínima señal detectable (perfilador) es de unos -170 dBm, mientras que la interferencia sólo es problemática a niveles de -135 dBm o superiores.

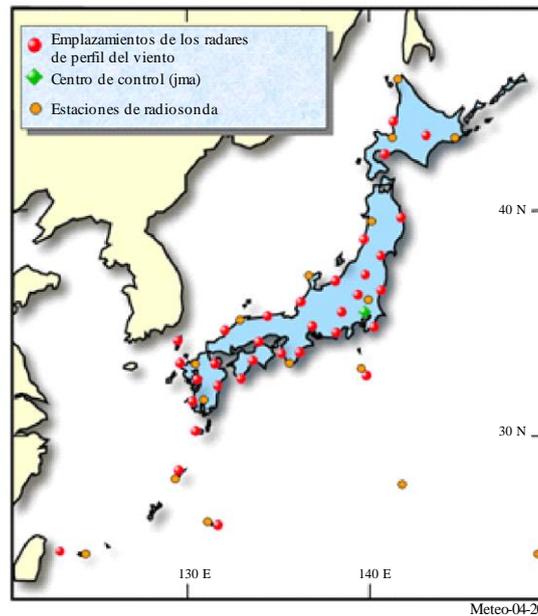
Como otro ejemplo de compartición con los radares de perfil del viento, la banda 1 215-1 300 MHz fue atribuida al servicio de radionavegación por satélite en la CMR-2000. Desde entonces, se han realizado algunos estudios técnicos para evaluar la compatibilidad entre estos sistemas del SRNS y los radares de perfil del viento que funcionan en la banda 1 270-1 295 MHz. Los resultados de estos estudios figuran en el Informe 90 de ECC. Este Informe llega a la conclusión de que, en algunas condiciones, los sistemas del SRNS podrían interferir y degradar el funcionamiento de los radares de perfil del viento, al menos en el caso de radares con tres haces. No obstante, este Informe indica un cierto número de técnicas de reducción de la interferencia (por hardware o software) que podrían ayudar a superar estas dificultades. Algunas de estas técnicas incluyen la selección de puntería de la antena, la adición de haces o la implementación de radares de perfil del viento a las frecuencias

de 1 274 ó 1 294 MHz, en los nulos de las modulaciones del SRNS, siendo este último método probablemente el más sencillo de aplicar.

La Agencia de Meteorología de Japón (JMA) explota una red de radares de perfil del viento y un sistema de adquisición de datos (WINDAS) para supervisar y predecir el desarrollo de fenómenos atmosféricos violentos. La red consta de treinta y tres radares de perfil del viento de 1,3 GHz instalados a lo largo de Japón que se comunican con un centro de control ubicado en la sede central de la JMA en Tokio (Figura 4-20).

FIGURA 4-20

#### Ejemplo de red de radares de perfil del viento



A continuación los datos se distribuyen en todo el mundo a través del sistema mundial de telecomunicaciones, y también figuran en el sitio web de la JMA (<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>). Además los datos se combinan con los procedentes de los radares Doppler y las aeronaves comerciales para proporcionar un «análisis completo de los vientos de la atmósfera superior».



## CAPÍTULO 5

**TELEDETECCIÓN PASIVA Y ACTIVA A BORDO DE VEHÍCULOS  
ESPACIALES PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS**

	<i>Página</i>
5.1	Introducción ..... 76
5.2	La teledetección radiométrica pasiva de microondas..... 78
5.2.1	Requisitos espectrales ..... 78
5.2.2	Observaciones de las características de la superficie terrestre ..... 82
5.2.3	Parámetros de calidad de funcionamiento..... 84
5.2.4	Típicas condiciones de funcionamiento de los sensores pasivos ..... 85
5.2.5	Principales características técnicas ..... 86
5.2.6	Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia..... 87
5.2.7	Medición tridimensional de parámetros atmosféricos ..... 87
5.3	Sensores activos ..... 96
5.3.1	Introducción ..... 96
5.3.2	Radares de abertura sintética (SAR) ..... 97
5.3.3	Altímetros..... 99
5.3.4	Dispersímetros ..... 100
5.3.5	Radares de precipitación ..... 102
5.3.6	Radares de perfil de nubes ..... 103
5.3.7	Criterios de interferencia y de calidad de funcionamiento de los sensores..... 104
5.3.8	Niveles de densidad de flujo de potencia (dfp)..... 104

## 5.1 Introducción

La existencia de los satélites meteorológicos es sobradamente conocida en la mayor parte del mundo y las imágenes que transmiten se muestran regularmente en la televisión, en la prensa y en Internet. La mayoría de la gente ya está acostumbrada a ver imágenes de mapas con color mejorado mostrando las capas de nubes, las temperaturas de la superficie, el manto de nieve y otros fenómenos meteorológicos, o, menos frecuentemente, imágenes que muestran la distribución de los incendios forestales y las nubes de humo resultantes, las cenizas volcánicas y las temperaturas de la superficie del mar que han sido objeto de gran atención por parte del público a causa del fenómeno *El Niño*.

La mayoría de estas imágenes tienen en común el hecho de que han sido generadas utilizando fundamentalmente datos registrados mediante sensores en las regiones visible e infrarroja. Sin embargo, la mayoría de estos productos y otros productos se generan utilizando una gran variedad de frecuencias de microondas, de manera aislada o en combinación con otras mediciones a otras frecuencias.

Por consiguiente, no es muy conocido el hecho de que la teledetección a bordo de vehículos espaciales de la superficie de la Tierra y la atmósfera, utilizando frecuencias radioeléctricas, desde las ondas métricas pasando por las microondas hasta las regiones superiores del espectro, desempeñan un papel fundamental y cada vez más importante en la meteorología operacional y de investigación, en particular para reducir el impacto de las catástrofes debidas al clima y a los fenómenos meteorológicos y en la comprensión, observación y predicción científica del cambio climático y sus repercusiones.

Los enormes progresos realizados en los últimos años en los análisis y predicciones meteorológicas y del clima, incluidos los avisos de fenómenos climatológicos peligrosos (lluvias torrenciales, tormentas, ciclones) que afectan a todas las poblaciones y economías, se deben en gran medida a datos de observaciones realizadas a bordo de vehículos espaciales y su representación mediante modelos numéricos.

Estudios recientes efectuados en Europa confirman que los satélites Metop, que llevan varios teledetectores diferentes (pasivos y activos), contribuyen notablemente al rendimiento de la predicción meteorológica numérica (*Numerical Weather Prediction*, NWP), ya que representan un 25% de la reducción de los errores de previsión a 24 horas vista debido a todas las observaciones recibidas en tiempo real por los modelos. A causa de esta elevada contribución a la reducción de los errores de previsión, una parte considerable de las grandes ventajas socioeconómicas de las previsiones meteorológicas, estimadas en 61 400 millones de Euros anuales en la Unión Europea, puede ser atribuida a los satélites Metop (del orden de 4 900 millones de Euros anuales).

Hay dos clases de teledetección a bordo de vehículos espaciales ampliamente utilizadas, **pasiva** y **activa**, que funcionan en el servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS), actualmente sólo en satélites no OSG.

La **teledetección pasiva** utiliza solamente receptores, no habiendo transmisores de ningún tipo. La radiación que estos receptores pretenden captar se produce espontáneamente, normalmente con niveles de potencia muy bajos, y contiene información esencial sobre los procesos físicos que se están investigando. Son interesantes los tipos de radiación que indican la presencia de determinados componentes químicos o la ausencia de ciertas frecuencias que indican la absorción de las señales en dichas frecuencias por los gases de la atmósfera. La intensidad o ausencia de señales de determinadas frecuencias se utiliza para determinar la presencia de gases específicos (de los que la humedad y los contaminantes son ejemplos evidentes) y, en su caso, la cantidad y ubicación de los mismos. Puede obtenerse una gran diversidad de información sobre el medio ambiente utilizando sensores pasivos que funcionan en bandas de frecuencias que vienen determinadas por las propiedades físicas fijas (resonancia o absorción de radiaciones molecular) de la sustancia examinada y cuyas propiedades físicas no pueden duplicarse en otras bandas de frecuencias. La intensidad de la señal a una frecuencia específica puede depender de diversas variables, lo que implica utilizar distintas frecuencias para determinar las diferentes incógnitas. La utilización de varias frecuencias es la técnica primordial para medir las diversas características de la atmósfera y de la superficie de la Tierra.

La **teledetección activa** difiere de la teledetección pasiva en que intervienen tanto transmisores como receptores a bordo de satélites. Normalmente se transmite una señal y la señal reflejada es recibida por el mismo satélite, aunque no siempre es así. La aplicación de la teledetección activa comprende, pero no exclusivamente, la medición de las características de la superficie del mar, tales como los vientos y la altura de las ondas marinas, y la determinación de la densidad forestal de las selvas tropicales.

La cuestión de compatibilidad entre ambas clases de teledetección plantea los mismos problemas que los de otros servicios espaciales: interferencia mutua entre receptores de satélite y otras estaciones transmisoras de RF, ya sea en tierra o en el espacio. La resolución de estos problemas pasa por el empleo de técnicas sobradamente conocidas que suelen implicar la coordinación con otros usuarios en términos de limitación de potencia, características de antena y compartición en el tiempo y en la frecuencia.

Una forma de vulnerabilidad peculiar de los satélites para la teledetección pasiva, y particularmente para los que tienen una gran zona de medición de muestras, deriva del hecho de que cada medición puede estar sujeta a la radiación acumulada de una multitud de emisores en tierra, tanto en banda como fuera de banda. Por consiguiente, si bien es posible que un solo emisor terrenal no radie suficiente potencia para causar errores en mediciones de teledetección pasiva, muchos de estos emisores pueden resultar perjudiciales para las mediciones realizadas combinando esas señales interferentes. Esta combinación de interferencias de varios emisores hecho suscita la preocupación actual en relación con las emisiones de los sistemas del servicio fijo de alta densidad (HDSF, *high density fixed service*), las aplicaciones de banda ultraancha (UWB, *ultra wide-band*) y los dispositivos de corto alcance (SRD, *short-range devices*) o industriales científicos y médicos (ICM). La raíz del posible problema es la densidad espacial de dichos emisores en una zona de medición, sumada a las características individuales de cada uno de ellos. La situación es cada vez más grave porque está aumentando la densidad de tales dispositivos activos terrenales y ya se han informado de casos de interferencia perjudicial.

Varios parámetros geofísicos contribuyen, a diversos niveles, a las emisiones naturales del parámetro específico observado a una frecuencia determinada. Por lo tanto, las mediciones a diversas frecuencias en el espectro de las microondas deben realizarse simultáneamente para aislar y recuperar cada contribución individual del conjunto de emisiones naturales y extraer los parámetros de interés del conjunto determinado de mediciones. En consecuencia, la interferencia que tiene repercusiones en cierto número de bandas de frecuencias «pasivas» podría también tener repercusiones sobre la medición global de una componente atmosférica específica obtenida en un conjunto de frecuencias prescritas.

En el caso de los pares transmisor-receptor, la naturaleza y características de las señales son conocidas por lo que resulta relativamente sencillo determinar si esas señales van a recibirse correctamente. A este respecto hay muchas publicaciones sobre técnicas útiles para la detección y corrección de errores en los sistemas de radiocomunicaciones, pero estas técnicas por desgracia no sirven cuando no se conocen las características de las diversas señales recibidas. Esto es exactamente lo que ocurre con la teledetección pasiva cuya vulnerabilidad a la interferencia es única porque esta vulnerabilidad viene causada por el carácter no determinístico de la señal natural para cuya recepción se ha diseñado el sensor pasivo y por el nivel extremadamente bajo de la radiación natural medida.

Incluso los niveles muy bajos de interferencia recibidos por un sensor pasivo pueden degradar sus datos y la mayor amenaza consiste en que la interferencia no se detecte, los datos incorrectos se confundan con datos válidos y las conclusiones obtenidas a partir de los análisis de estos datos incorrectos contengan graves errores. En la mayoría de los casos los sensores pasivos no pueden discriminar entre las radiaciones natural y artificial y los errores resultantes en los datos no se pueden detectar ni corregir. Por consiguiente, parece que mantener la integridad de los datos depende ahora exclusivamente de la prevención de la interferencia y la utilización de límites normativos de la interferencia y de la potencia máxima de emisión a escala mundial. Puede observarse que un cierto número de disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones utilizan estos límites de potencia para activar transmisores de servicio a fin de proteger los sensores pasivos contra la interferencia en banda y fuera de banda.

En los últimos años la utilización de radares de ondas milimétricas en la aplicación de la investigación de las nubes ha suscitado un interés considerable. La necesidad de profundizar en la comprensión de la función que desempeñan las nubes en nuestro sistema climático es primordial en la investigación del cambio climático. Los últimos adelantos de la tecnología de radares de ondas milimétricas han hecho que este impulso investigador se convierta en el principal motor de desarrollo de los radares de perfiles de nubes de ondas milimétricas. Estos radares, que funcionan principalmente en la proximidad de 36 GHz (banda Ka) y de 94 GHz (banda W), son capaces de proporcionar la información cualitativa y cuantitativa que necesitan los investigadores meteorológicos. Su sensibilidad a los pequeños hidrometeoros, su elevada resolución espacial, la mínima susceptibilidad al eco del suelo y su tamaño relativamente pequeño hace que los radares de ondas milimétricas constituyan un excelente instrumento para la investigación de las nubes. Pueden utilizarse en emplazamientos fijos en tierra, en emplazamientos móviles en tierra, transportados en aviones y embarcados en plataformas espaciales.

## **5.2 La teledetección radiométrica pasiva de microondas**

La radiometría pasiva de microondas es un instrumento de importancia primordial para la observancia de la Tierra. En el SETS funcionan sensores pasivos diseñados para recibir y medir las emisiones naturales producidas por la superficie terrestre y por su atmósfera. La frecuencia e intensidad de estas emisiones naturales caracterizan el tipo y el estado de varios parámetros importantes, geofísicos, atmosféricos y de la superficie (tierra, mar y casquetes polares), que describen el estado del sistema Tierra/atmósfera/océanos y de sus mecanismos:

- parámetros de la superficie terrestre tales como la humedad del suelo, la temperatura de la superficie del mar, la intensidad de los vientos oceánicos, la extensión del hielo y su antigüedad, el manto de nieve, la pluviosidad sobre tierra, etc.; y
- parámetros atmosféricos tridimensionales (atmósfera baja, media y superior) tales como los perfiles de temperatura, el contenido de vapor de agua y los perfiles de concentración de los gases residuales de importancia radioactiva y química (por ejemplo el ozono, el ácido nitroso y el cloro).

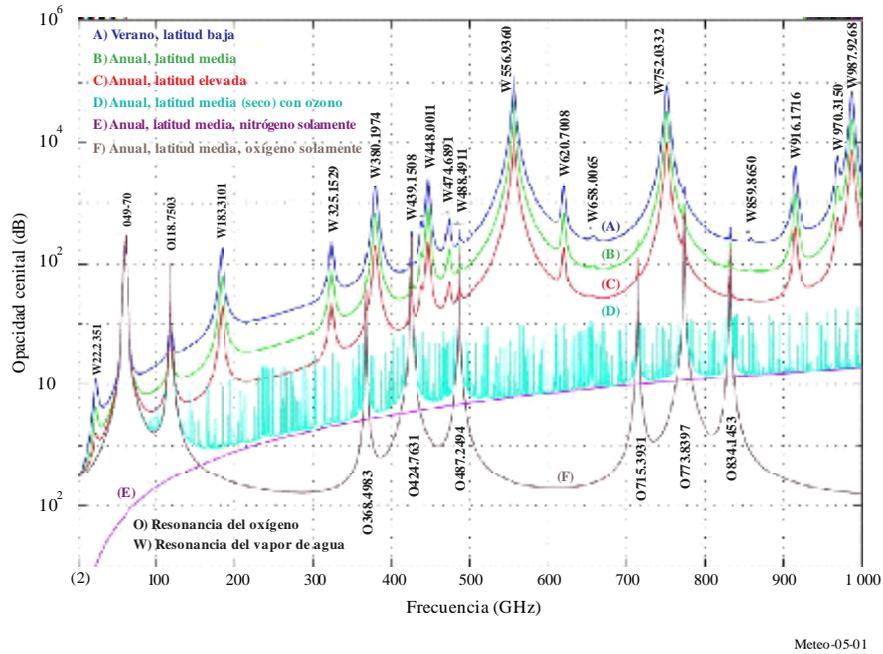
Las técnicas de microondas permiten la observación de la superficie de la Tierra y su atmósfera desde órbitas terrestres incluso en presencia de nubes, que resultan transparentes a frecuencias por debajo de 100 GHz. Esta independencia del clima tiene un enorme interés para la observación de la Tierra porque más del 60% de la superficie terrestre está cubierta normalmente de nubes. Además de esta independencia del clima, las mediciones pasivas por microondas pueden realizarse a cualquier hora del día puesto que no dependen de la luz solar. La teledetección pasiva de microondas constituye un instrumento importante ampliamente utilizado para supervisión y para los estudios meteorológicos, climatológicos y medioambientales (en aplicaciones operacionales y científicas), para los que es indispensable la fiabilidad de la cobertura mundial reiterada.

### **5.2.1 Requisitos espectrales**

Hay varios parámetros geofísicos que suelen contribuir, en mayor o menor medida, a las emisiones naturales y que pueden observarse a una frecuencia determinada. Por este motivo, las mediciones en varias frecuencias del espectro de microondas deben realizarse simultáneamente a fin de aislar y recuperar cada una de las contribuciones individuales. Las curvas de absorción atmosférica, mostradas en la Figura 5-1, se caracterizan por crestas debidas a la resonancia molecular de los gases atmosféricos y por el continuum de vapor de agua que aumenta sensiblemente con la frecuencia.

FIGURA 5-1

**Opacidad cenital de la atmósfera debido al vapor de agua y a los componentes secos**



La selección de las frecuencias idóneas para la detección pasiva por microondas depende estrechamente de las características de la atmósfera:

- las frecuencias de observación de los parámetros de superficie se seleccionan por debajo de 100 GHz, donde la absorción atmosférica es más débil. Se necesita, por término medio, una frecuencia por octava; y
- las frecuencias de observación de los parámetros atmosféricos se seleccionan con mucho cuidado especialmente por encima de 50 GHz dentro de las crestas de absorción de los gases atmosféricos.

Las frecuencias y anchuras de banda requeridas de interés por debajo de 1000 GHz se recogen en el Cuadro 5-1. La mayor parte de las atribuciones de frecuencia por encima de 100 GHz contienen líneas de absorción de compuestos químicos atmosféricos residuales importantes.

CUADRO 5-1

**Bandas de frecuencias y anchuras de banda de interés científico  
en la detección pasiva por satélites por debajo de 1 000 GHz\***

<b>Banda de frecuencias atribuida (GHz)</b>	<b>Anchura de banda atribuida y {deseada} (MHz)</b>	<b>Mediciones principales</b>
1,37-1,427	57	Humedad del suelo, salinidad, temperatura de la superficie de los océanos, índice de vegetación
2,64-2,7	60	Salinidad de los océanos, humedad del suelo, índice de vegetación
4,2-4,4	200	Temperatura de la superficie del océano
6,425-7,25 (RR 5.458)	350	Temperatura de la superficie del océano (sin atribución)
10,6-10,7	100	Índice de pluviosidad, contenido de agua de la nieve, morfología del hielo, estado del mar, velocidad de los vientos del océano
15,2-15,4	200	Vapor de agua, índice de pluviosidad
18,6-18,8	200	Lluvia, estado del mar, hielo en el océano, vapor de agua, nieve, velocidad de los vientos del océano, emisividad y humedad del suelo
21,2-21,4	200	Vapor de agua, agua líquida en las nubes
22,21-22,5	290	Vapor de agua, agua líquida en las nubes
23,6-24	400	Vapor de agua, agua líquida en las nubes, canal asociado para sondeo atmosférico
31,3-31,8	500	Hielo del mar, vapor de agua, vertidos de crudo, nubes, agua líquida, temperatura superficial, ventana de referencia para la gama 50-60 GHz
36-37	1 000	Índice de pluviosidad, nieve, hielo del mar, nubes
50,2-50,4	200	Ventana de referencia para el perfil de la temperatura atmosférica (temperatura de la superficie)
52,6-59,3	6 700 <sup>(1)</sup>	Perfil de la temperatura atmosférica (rayas de absorción del O <sub>2</sub> )
86-92	6 000	Nubes, vertidos de crudo, hielo, nieve, lluvia, ventana de referencia para sondeos de temperatura a proximidad de 118 GHz
100-102	2 000	N <sub>2</sub> O, NO
109,5-111,8	2 300	O <sub>3</sub>
114,25-116	1 750 <sup>(1)</sup>	CO
115,25-122,25	7 000 <sup>(1)</sup>	Perfil de la temperatura atmosférica (raya de absorción del O <sub>2</sub> )
148,5-151,5	3 000	N <sub>2</sub> O, temperatura de la superficie de la Tierra, parámetros de nubes, ventana de referencia para sondeo de temperatura
155,5-158,5	3 000	Parámetros de la Tierra y las nubes
164-167	3 000	N <sub>2</sub> O, agua y hielo de nubes, lluvia, CO, ClO
174,8-191,8	17 000 <sup>(1)</sup>	N <sub>2</sub> O, perfil del vapor de agua, O <sub>3</sub>
200-209	9 000 <sup>(2)</sup>	N <sub>2</sub> O, ClO, vapor de agua, O <sub>3</sub>
226-231,5	5 500	Nubes, humedad, N <sub>2</sub> O (226,09 GHz), CO (230,54 GHz), O <sub>3</sub> (231,28 GHz), ventana de referencia
235-238	3 000 <sup>(2)</sup>	O <sub>3</sub>
250-252	2 000 <sup>(2)</sup>	N <sub>2</sub> O
275-285,4	10 400 <sup>(2)</sup>	N <sub>2</sub> O, ClO

CUADRO 5-1 (fin)

Banda de frecuencias atribuida (GHz)	Anchura de banda atribuida y {deseada} (MHz)	Mediciones principales
296-306	10 000 <sup>(2)</sup>	Canal lateral para sonda de temperatura, OXÍGENO, HNO <sub>3</sub> , HOCl, N <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , O <sub>17</sub> O
313-355,6	42 100 <sup>(2)</sup>	Perfil de vapor de agua, nube, Canal lateral para sonda de temperatura HDO, ClO, HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , HOCl, CH <sub>3</sub> Cl, O <sup>18</sup> O, CO, BrO, CH <sub>3</sub> CN, N <sub>2</sub> O, HCN
361,2-365	3 800 <sup>(2)</sup>	O <sub>3</sub>
369,2-391,2	22 000 <sup>(2)</sup>	Perfil de vapor de agua, H <sub>2</sub> O
397,2-399,2	2 000	Perfil de vapor de agua
409-411	2 000	Sonda de temperatura
416-433,46	17 460 <sup>(2)</sup>	Oxígeno, perfil de temperatura, O <sub>2</sub>
439,1-466,3	27 200	Perfil de vapor de agua, nube, HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, CO
477,75-496,75	19 000	Oxígeno, perfil de temperatura, O <sub>2</sub>
497-502	5 000 <sup>(2)</sup>	Canal lateral para el perfil de vapor de agua, O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, BrO
523-527	4 000 <sup>(2)</sup>	Canal lateral para el perfil de vapor de agua
538-581	43 000 <sup>(2)</sup>	Perfil de vapor de agua, ClO, H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub>
611,7-629,7	18 000 <sup>(2)</sup>	Perfil de vapor de agua, oxígeno, H <sub>2</sub> O, ClO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , BrO, CH <sub>3</sub> CN, (H <sup>37</sup> Cl), H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , HOCl, O <sub>3</sub> , HO <sub>2</sub> , H <sup>35</sup> Cl, CH <sub>3</sub> Cl, O <sup>18</sup> O
634-654	20 000 <sup>(2)</sup>	Canal lateral para el perfil de vapor de agua, HOCl, H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O, SO <sub>2</sub> , ClO, HO <sub>2</sub> , BrO, HNO <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> , NO, N <sub>2</sub> O
656,9-692 (RR 5.565)	35 100 <sup>(2)</sup>	Perfil de vapor de agua, nube, H <sub>2</sub> O, HO <sub>2</sub> , ClO, CH <sub>3</sub> Cl, CO
713,4-717,4	4 000 <sup>(2)</sup>	O <sub>2</sub>
729-733	4 000 <sup>(2)</sup>	HNO <sub>3</sub> , O <sup>18</sup> O
750-754	4 000 <sup>(2)</sup>	H <sub>2</sub> O
771,8-775,8	4 000 <sup>(2)</sup>	O <sub>2</sub>
823,15-845,15	22 000 <sup>(2)</sup>	O <sub>2</sub>
850-854 (RR 5.565)	4 000 <sup>(2)</sup>	NO
857,9-861,9	4 000 <sup>(2)</sup>	H <sub>2</sub> O
866-882	16 000 <sup>(2)</sup>	Nube, ventana
905,17-927,17	22 000 <sup>(2)</sup>	H <sub>2</sub> O
951-956	5 000 <sup>(2)</sup>	O <sub>2</sub> , NO, H <sub>2</sub> O
968,31-972,31	4 000 <sup>(2)</sup>	H <sub>2</sub> O
985,9-989,9	4 000 <sup>(2)</sup>	H <sub>2</sub> O

\* NOTA – Para obtener información actual sobre atribuciones de frecuencias a sensores pasivos, debe consultarse el Cuadro de atribución de bandas de frecuencias del Artículo 5 del RR. Para obtener información adicional sobre frecuencias preferidas para la teledetección pasiva, debe consultarse la última versión de la Recomendación UIT-R RS.515.

(1) Esta anchura de banda la ocupan varios canales.

(2) Esta anchura de banda la ocupan varios sensores.

## 5.2.2 Observaciones de las características de la superficie terrestre

Para la medición de los parámetros de superficie (por ejemplo, el vapor de agua, la temperatura de la superficie del mar, la velocidad del viento, índice de pluviosidad, etc.), deben seleccionarse los llamados canales radiométricos «ventana» de modo que puede haber un muestreo regular del espectro de microondas entre 1 GHz y 90 GHz (una frecuencia/octava por término medio). No obstante, por regla general no suele ser necesario realizar ajustes de frecuencia de gran precisión porque las emisiones naturales de los parámetros de superficie no dependen excesivamente de la frecuencia. En general, hay varios parámetros geofísicos que contribuyen en mayor o menor medida a la emisión natural que puede observarse a una frecuencia determinada. Esto se refleja en las Figuras 5-2 a 5-3 que representan la sensibilidad de las emisiones naturales de microondas a varios parámetros geofísicos en función de la frecuencia. La temperatura de brillo es una medida de la intensidad de la radiación térmica emitida por un objeto y se expresa en unidades de temperatura porque existe una correlación entre la intensidad de la radiación emitida y la temperatura física del cuerpo radiante.

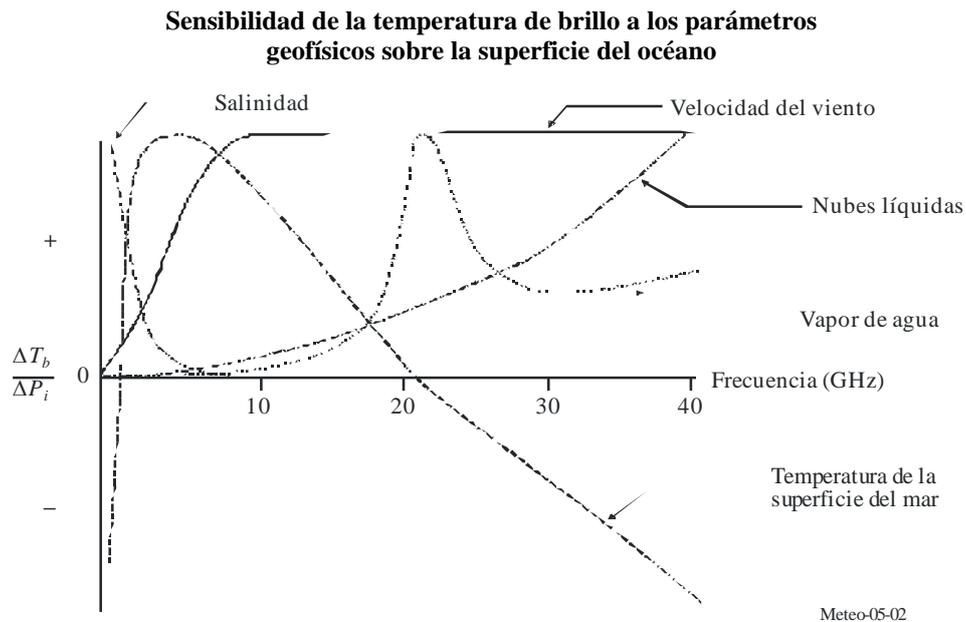
### 5.2.2.1 Observación de la superficie de los océanos

La teledetección sobre la superficie de los océanos se utiliza para medir muchos de los mismos parámetros que se miden sobre tierra (por ejemplo, vapor de agua, índice de pluviosidad y velocidad del viento) así como parámetros que proporcionan información sobre el estado del propio océano (por ejemplo, temperatura de la superficie del mar, salinidad del océano, espesor de la capa de hielo en el mar, etc.).

La Figura 5-2 muestra la sensibilidad de la temperatura de brillo a los parámetros geofísicos sobre la superficie de los océanos. Cabe observar lo siguiente:

- las mediciones a baja frecuencia, típicamente en torno a 1,4 GHz, permiten obtener la salinidad de los océanos;
- las mediciones en torno a 6 GHz presentan la máxima sensibilidad para la temperatura de la superficie del mar, aunque contienen una pequeña contribución de la salinidad y la velocidad del viento que pueden suprimirse por medio de mediciones en torno a 1,4 GHz y en torno a 10 GHz;
- la región 17-19 GHz, donde la «firma» de la temperatura de la superficie del mar y del vapor de agua atmosférico es menor, resulta óptima para la emisividad de la superficie del océano, que está directamente vinculada a la velocidad del viento cerca de la superficie y a la presencia de hielo en el mar. La temperatura de la superficie del océano tiene también cierta sensibilidad al contenido total de vapor de agua y a las nubes líquidas;
- el contenido total de vapor de agua puede medirse con más exactitud en torno a 24 GHz, mientras que las nubes líquidas se obtienen a partir de mediciones en torno a 36 GHz;
- se necesitan cinco frecuencias (en torno a 6 GHz, 10 GHz, 18 GHz, 24 GHz y 36 GHz) para la determinación de los parámetros dominantes.

FIGURA 5-2



### 5.2.2.2 Observación sobre la superficie terrestre

La teledetección sobre la superficie terrestre resulta algo más complejo debido a la gran variabilidad temporal y espacial de las características de dicha superficie (que va de zonas cubiertas por el hielo y la nieve a desiertos y selvas tropicales). Además, la señal recibida por el sensor pasivo debe propagarse por varios medios distintos: básicamente el suelo, tal vez nieve o hielo, la capa de vegetación, la atmósfera, las nubes y a veces la lluvia o la nieve. El segundo aspecto a considerar es que para cada uno de estos medios hay varios factores que pueden influir en la radiación emitida. Por ejemplo, la temperatura de brillo del suelo depende de su temperatura real del suelo, del contenido de humedad del suelo, de la rugosidad de su superficie y de su textura. Análogamente, la contribución de la vegetación está relacionada con la temperatura y la estructura de la cubierta forestal a través de la opacidad y el albedo de dispersión simple (es decir, la relación entre la luz reflejada y la incidente). La forma en que estos factores afectan a la señal es interdependiente con la frecuencia. La Figura 5-3 muestra la sensibilidad normalizada en función de la frecuencia para varios parámetros clave.

La Figura 5-3 muestra que sobre tierra y para una zona de temperatura media, es necesario utilizar:

- baja frecuencia, para medir la humedad del suelo (en torno a 1 GHz);
- mediciones entre 5 GHz y 10 GHz, aproximadamente, para estimar la biomasa de vegetación una vez conocida la contribución de la humedad del suelo;
- dos frecuencias en torno a la cresta de absorción de vapor de agua (típicamente 18-19 GHz y 23-24 GHz), para evaluar la contribución atmosférica;
- una frecuencia en torno a 37 GHz para evaluar el agua líquida de las nubes (con 18 GHz) y/o la estructura de la vegetación (con 10 GHz), la rugosidad de la superficie (con 1 GHz y 5 GHz ó 10 GHz).

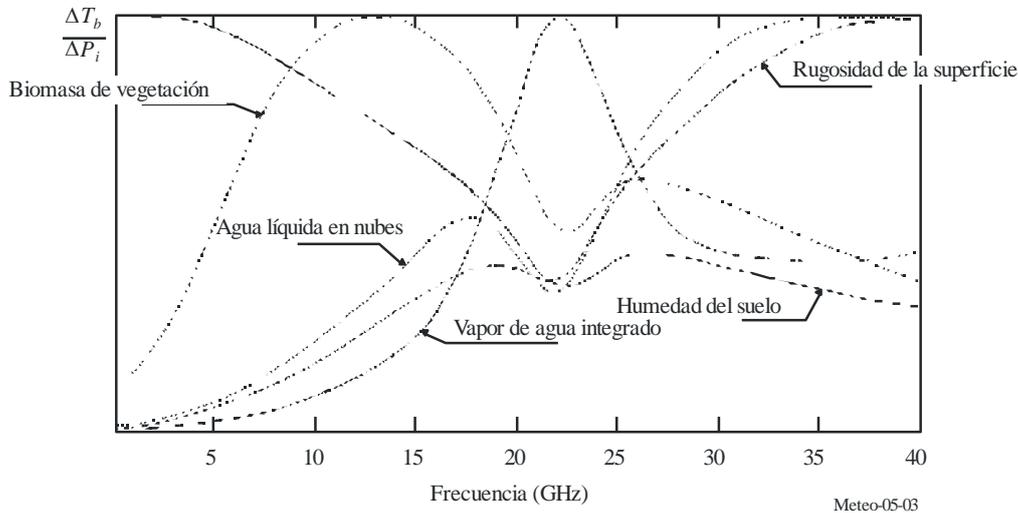
Resulta de utilidad una frecuencia a 85 GHz ó 90 GHz para la supervisión de la pluviosidad, pero sólo cuando todos los demás factores concomitantes puedan evaluarse a frecuencias bajas.

Los estudios realizados con el radiómetro de microondas de exploración multicanal (SMMR, *scanning multichannel microwave radiometer*) y el generador de imágenes de microondas de sensor especial (SMM/I, *special sensor microwave/imager*) han puesto de manifiesto que pueden recuperarse algunas otras variables. Entre éstas se encuentra la temperatura de la superficie (con menos precisión que las mediciones de infrarrojos pero viable en todas las condiciones meteorológicas) utilizando un canal en las proximidades de 19 GHz cuando pueda estimarse la contribución superficial y la atmosférica.

Es importante supervisar las zonas cubiertas de nieve y para ello es imprescindible efectuar mediciones en varias frecuencias. Efectivamente hay que distinguir la nieve del hielo, así como la antigüedad de la nieve. La señal correspondiente depende de la estructura de las capas de nieve y del tamaño de sus cristales. Para recuperar esta información se ha puesto de manifiesto la necesidad de utilizar varias frecuencias, normalmente 19,37 GHz y 85-90 GHz.

FIGURA 5-3

### Sensibilidad de la temperatura de brillo a los parámetros geofísicos sobre la superficie terrestre



#### 5.2.2.3 Parámetros auxiliares de otros instrumentos de teledetección

Los altímetros de radar a bordo de vehículos espaciales funcionan actualmente a nivel mundial sobrevolando la superficie de los océanos y de los continentes, y dando soporte a importantes aplicaciones de la oceanografía y climatología (véase el punto 5.2.3). Para suprimir los efectos de la refracción atmosférica cuando se utilizan datos de altimetría de gran exactitud obtenidos alrededor de 13,5 GHz es preciso realizar además un conjunto de mediciones pasivas auxiliares en torno a 18,7 GHz, 24 GHz y 36 GHz.

Para poder separar las diversas contribuciones a las señales captadas por un satélite es imprescindible tener acceso simultáneamente a mediciones efectuadas en cinco frecuencias distintas como mínimo.

#### 5.2.3 Parámetros de calidad de funcionamiento

Los sensores pasivos se caracterizan por su sensibilidad radiométrica y su resolución geométrica.

##### 5.2.3.1 Sensibilidad radiométrica

Este parámetro generalmente se expresa como la temperatura diferencial más pequeña,  $\Delta T_e$ , que puede detectar el sensor.  $\Delta T_e$  viene dada por la expresión:

$$\Delta T_e = \frac{\alpha T_s}{\sqrt{B\tau}} \quad \text{K} \quad (5-1)$$

donde:

- $B$ : anchura de banda del receptor (Hz)
- $\tau$ : tiempo de integración (s)
- $\alpha$ : constante del sistema receptor (depende de la configuración)
- $T_s$ : temperatura de ruido del sistema receptor (K).

### 5.2.3.2 Umbral del radiómetro $\Delta P$

Se trata de la variación de potencia más pequeña que puede detectar el sensor pasivo,  $\Delta P$  viene dado por:

$$\Delta P = k\Delta T_e B \quad \text{W} \quad (5-2)$$

donde:

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ (J/K): constante de Boltzmann.}$$

El valor de  $\Delta P$  se calcula utilizando  $\Delta T_e$  y se utiliza para determinar la interferencia máxima admisible que un sensor puede tolerar sin degradar las mediciones. En el futuro,  $T_s$  disminuirá como  $\Delta T_e$  (véase la ecuación (5-1)). Por consiguiente, a efectos de proteger las operaciones de sensores pasivos en el futuro,  $\Delta P$  debe calcularse utilizando un valor de  $\Delta T_e$  previsto razonable en vez del valor de  $\Delta T_e$  de la actual tecnología. De la misma forma, el tiempo de integración,  $\tau$ , probablemente aumentará a medida que se desarrolle la tecnología de teledetección (por ejemplo, el denominado concepto de barrido transversal). En consecuencia, el tiempo de integración también debe elegirse basándose en unas futuras expectativas razonables.

### 5.2.3.3 Resolución geométrica

En el caso de mediciones bidimensionales de parámetros de superficie, generalmente se considera que la apertura de la antena a  $-3$  dB determina la resolución transversal. Si se trata de mediciones tridimensionales de parámetros atmosféricos, también debe considerarse la resolución longitudinal a lo largo del eje de la antena. Esta resolución longitudinal es una función compleja de características de la atmósfera dependientes de la frecuencia y de las características de ruido y anchura de banda del receptor.

### 5.2.3.4 Tiempo de integración

Los receptores radiométricos detectan las emisiones térmicas similares al ruido recogidas por la antena y el ruido térmico del receptor. Integrando la señal recibida, pueden reducirse las fluctuaciones de ruido aleatorio y puede estimarse con precisión la suma del ruido del receptor y de la potencia de ruido de emisión térmica externa. El tiempo de integración es simplemente la cantidad de tiempo que necesita el receptor para integrar la señal recibida. El tiempo de integración también es un parámetro importante para la teledetección pasiva, que se deriva de una solución de compromiso compleja a la que se ha llegado teniendo en cuenta, en particular, la resolución geométrica deseada, la configuración de exploración del sensor y su velocidad con respecto a la escena observada.

## 5.2.4 Típicas condiciones de funcionamiento de los sensores pasivos

Los sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales se instalan fundamentalmente en dos tipos de sistemas de satélites complementarios: satélites en órbita terrestre baja y satélites geoestacionarios.

### 5.2.4.1 Satélites en órbita terrestre baja

Los sistemas basados en satélites en órbitas bajas, heliosíncronas (es decir, una órbita en la que el satélite pasa sobre un determinado punto de la superficie de la Tierra siempre a la misma hora solar local) y polares se utilizan para recoger datos medioambientales de alta resolución a escala mundial. El carácter de estas órbitas limita la frecuencia de repetición de las mediciones. Con un solo satélite se obtiene diariamente un máximo de dos coberturas mundiales a intervalos de 12 horas. Los radiómetros pasivos que funcionan en frecuencias inferiores a 100 GHz actualmente están instalados sólo en satélites en órbita baja. Ello se debe fundamentalmente a la dificultad de obtener la adecuada resolución geométrica en frecuencias relativamente bajas desde órbitas más altas, aunque esto puede cambiar en el futuro.

### 5.2.4.2 Satélites geoestacionarios

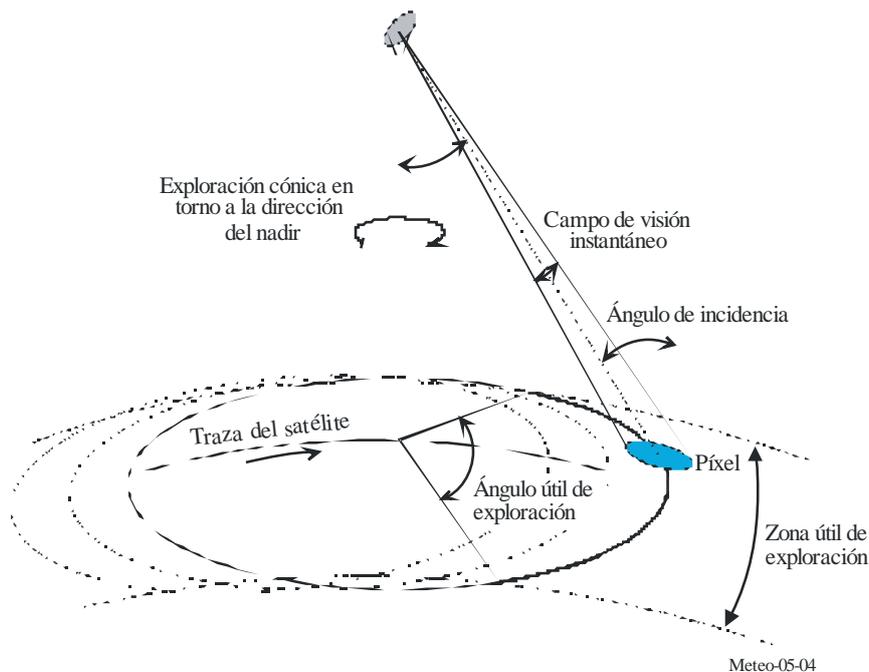
Los sistemas que utilizan satélites geoestacionarios se emplean para recoger datos con resolución baja a media a escala regional. La frecuencia de repetición de las mediciones viene limitada únicamente por la tecnología del hardware. Normalmente, se recogen datos de una región aproximadamente cada 30 minutos.

### 5.2.5 Principales características técnicas

La mayor parte de los sensores pasivos de microondas diseñados para captar las características de la superficie terrestre utiliza una configuración de exploración cónica (véase la Figura 5-4) centrada en la dirección del nadir (es decir, el punto que se encuentra directamente bajo el satélite), debido a lo importante que resulta para la interpretación de las mediciones de superficie el mantenimiento de un ángulo de incidencia constante respecto al suelo a lo largo de todas las líneas de exploración. La geometría de los instrumentos de exploración cónica se describe en la Figura 5-4.

FIGURA 5-4

#### Geometría típica de los radiométricos pasivos de microondas con exploración cónica



A continuación se indican algunas características geométricas típicas (correspondientes a 803 km de altitud):

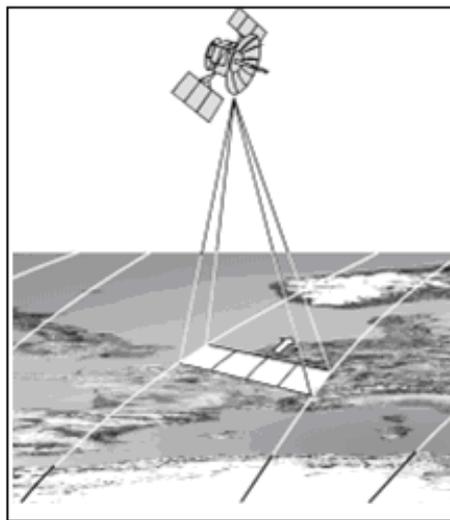
- ángulo de incidencia con el suelo en torno a  $55^\circ$
- semiángulo del cono  $46,7^\circ$  respecto a la dirección del nadir
- anchura del barrido: 1 600 km (limitada por la configuración de la exploración), permite la ejecución de dos coberturas diarias por un instrumento a latitudes medias y altas
- tamaño del píxel variable con la frecuencia y con el tamaño de la antena, típicamente desde 50 km a 6,9 GHz hasta 5 km a 89 GHz (basándose en un diámetro de 2 m)
- el periodo de exploración y el sistema de alimentación se escogen de modo que se garantice plena cobertura y tiempo de integración (y, por consiguiente, resolución radiométrica) óptimo a todas las frecuencias de medición, a costa de aumentar la complejidad del equipo físico.

Se pueden utilizar asimismo instrumentos ajenos a la exploración orientados al nadir para suministrar datos auxiliares destinados a aplicaciones específicas, teniendo en cuenta la supresión de los efectos atmosféricos en las mediciones de los altímetros de radar. Para facilitar su acomodación en los satélites, se están desarrollando técnicas interferométricas destinadas básicamente a mejorar la resolución espacial a baja frecuencia. Estos sensores utilizarán sistemas fijos de pequeñas antenas en vez de grandes antenas de exploración.

Un sensor de barrido transversal (a lo largo de la traza) es un tipo de sistema sensor que consta de una línea de sensores dispuesta perpendicularmente a la dirección de vuelo del vehículo espacial, como ilustra la Figura 5-5. A medida que el vehículo espacial se desplaza hacia adelante van detectándose distintas zonas de la superficie. El radiómetro de barrido transversal es un instrumento puramente estático sin partes móviles. La característica principal de este radiómetro es que todos los píxeles en una línea de exploración se obtienen simultáneamente y no de manera secuencial, como sucede con los sensores de exploración mecánica, lo que hace que este tipo de sensor aumente significativamente la resolución radiométrica obtenible. Los sensores de barrido transversal pueden utilizarse para una gran variedad de aplicaciones, incluidas las mediciones de los perfiles de temperatura de la atmósfera, de la humedad del suelo y de la salinidad de los océanos.

FIGURA 5-5

#### Geometría típica de los radiométricos pasivos de microondas de barrido transversal



Meteo-05-05

#### 5.2.6 Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia

Los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales que funcionan en el SETS figuran en la Recomendación UIT-R RS.2017.

#### 5.2.7 Medición tridimensional de parámetros atmosféricos

El espectro electromagnético contiene muchas bandas de frecuencias en las que se presentan fenómenos de absorción por parte de ciertos gases atmosféricos debido a la resonancia molecular (véase la Figura 5-1). Las frecuencias a las que se presentan estos fenómenos caracterizan a los gases (por ejemplo O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, ClO, etc.). El coeficiente de absorción depende de la naturaleza del gas, de su concentración y de su temperatura. Las mediciones pasivas en torno a estas frecuencias para determinar los perfiles de la temperatura y de la concentración del gas absorbente pueden efectuarse desde plataformas espaciales. Son de especial importancia para los sensores de teledetección pasiva que funcionan por debajo de 200 GHz las frecuencias de resonancia del oxígeno entre 50 GHz y 70 GHz, a 118,75 GHz y la frecuencia de resonancia del vapor de agua a 183,31 GHz.

El gas absorbente a la longitud de onda  $\lambda$  radia energía (a la misma frecuencia) con una intensidad proporcional a su temperatura  $T$  y a su índice de absorción  $\alpha = f(\lambda)$ . Esto obedece a la relación expresada en la ecuación (5-3):

$$I = \alpha \cdot L \quad (5-3)$$

donde:

- $l$ : brillo espectral del gas a la temperatura  $T$   
 $L = 2 \cdot k \cdot T/\lambda^2$ : brillo espectral del cuerpo negro a  $T$  ( $W/(m^2 \cdot sr \cdot Hz)$ )  
 $k = 1,38 \times 10^{-23}$ : constante de Boltzman ( $J/K$ )  
 $\alpha$ : característica del gas ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_3$ , etc.).

Hay dos gases en la atmósfera, el  $CO_2$  y el  $O_2$ , de importancia primordial en la detección pasiva para meteorología debido a que su concentración y presión en la atmósfera (dos parámetros que determinan el índice de absorción  $\alpha$ ) son casi constantes y conocidos en todo el mundo. Por consiguiente se pueden recuperar los perfiles de temperatura de la atmósfera mediante mediciones radiométricas a diversas frecuencias en las bandas de absorción pertinentes (típicamente en la región de infrarrojos en torno a  $15 \mu m$  para el  $CO_2$  y en la región de microondas en torno a  $60 GHz$  y  $118,75 GHz$  para el  $O_2$ ).

Se efectúan asimismo mediciones radiométricas en las bandas de absorción específicas de otros gases atmosféricos de importancia radioactiva y química de concentración variable y desconocida ( $H_2O$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $ClO$ , etc.). No obstante, en este caso, el conocimiento de los perfiles de temperatura de la atmósfera es obligatorio a fin de recuperar los perfiles verticales de concentración de estos gases que son desconocidos.

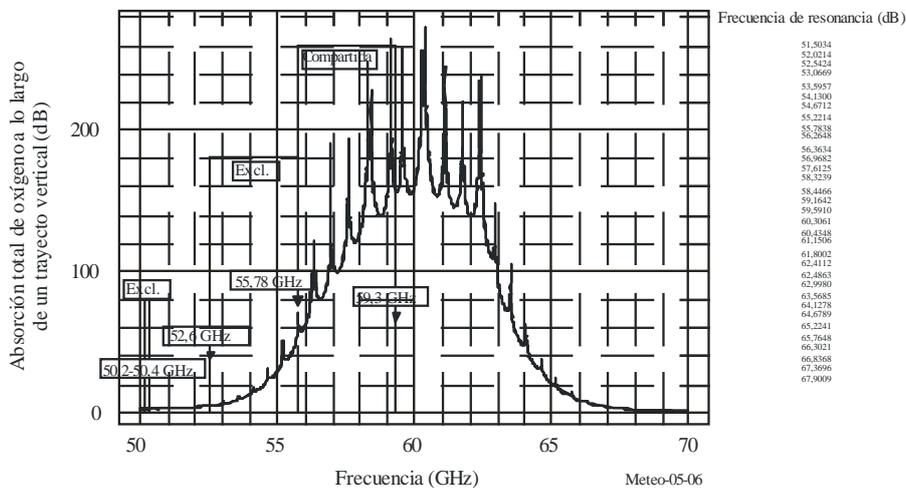
### 5.2.7.1 Sondas atmosféricas verticales pasivas de microondas

El sondeo atmosférico es una medición de la distribución vertical de las propiedades físicas de una columna de la atmósfera, tales como presión, temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, contenido de agua líquida, concentración de ozono, contaminación y otras propiedades. Las sondas atmosféricas verticales, (es decir, los instrumentos que realizan mediciones por sondeo atmosférico) son sensores orientados al nadir diseñados fundamentalmente para recuperar los perfiles verticales de la temperatura y de la humedad atmosférica. Utilizan canales de frecuencias seleccionados cuidadosamente dentro del espectro de absorción del  $O_2$  y del  $H_2O$  atmosféricos. Las Figuras 5-6 a 5-8 muestran en detalle los espectros de absorción en la proximidad de sus principales frecuencias de resonancia por debajo de  $200 GHz$ . Obsérvese la gran variabilidad del espectro de absorción de vapor de agua en torno a  $183 GHz$ , dependiente de la zona climática y de las condiciones meteorológicas locales.

FIGURA 5-6

#### Espectro de absorción del $O_2$ a lo largo de un trayecto vertical en torno a $60 GHz$ (varias líneas de absorción)

Requisitos de los sensores pasivos en el espectro de absorción del  $O_2$  en torno a  $60 GHz$   
(atmósfera normalizada de Estados Unidos de América)



NOTA – La Figura 5-6 también representa la posición y las atribuciones al SETS y su categoría entre  $50$  y  $60 GHz$  ( $50,2-50,4 GHz$  (exclusiva),  $52,6-55,78 GHz$  (exclusiva) y  $55,78-59,3 GHz$  (compartida)).

FIGURA 5-7

**Espectro de absorción del O<sub>2</sub> a lo largo de un trayecto vertical en torno a 118,75 GHz  
(una sola línea de absorción)**

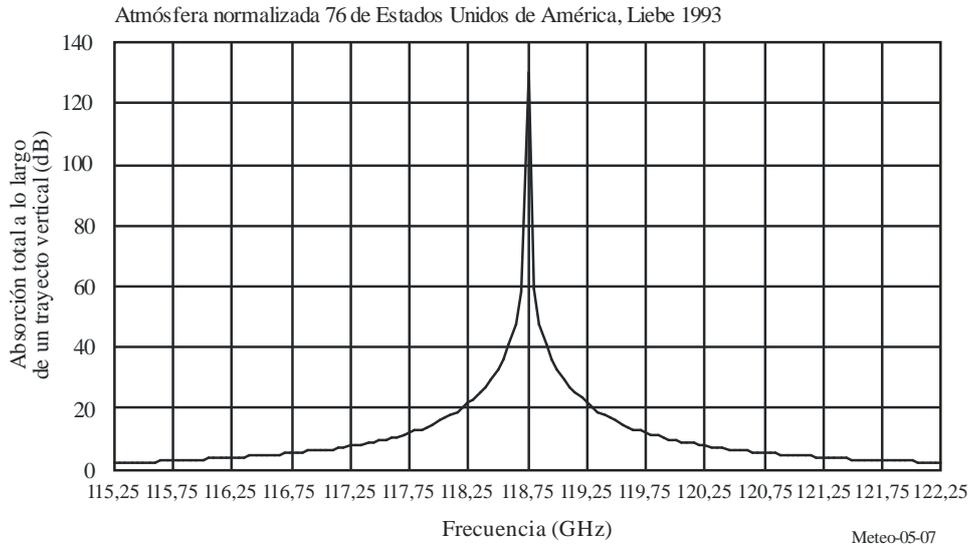
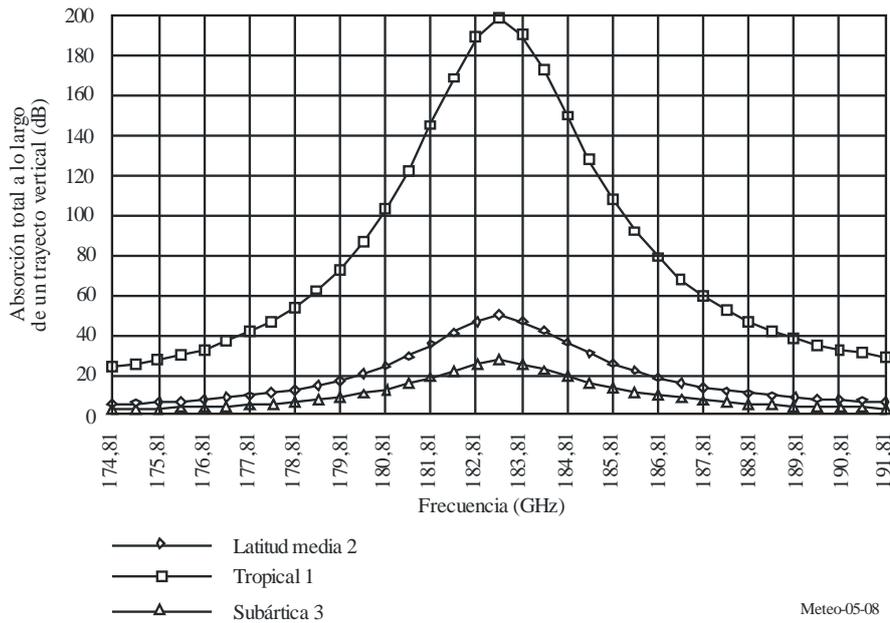


FIGURA 5-8

**Espectro de absorción del vapor de agua a lo largo de un trayecto vertical en torno a 183,31 GHz**



**5.2.7.2 Mecanismo del sondeo atmosférico vertical**

En el sondeo atmosférico vertical desde el espacio, el radiómetro mide la contribución total de la atmósfera desde la superficie hasta el límite superior, a distintas frecuencias (infrarrojo o microondas).

Cada capa (caracterizada por su altitud) radia energía proporcionalmente a su temperatura local y a su índice de absorción. La energía ascendente (en dirección del radiómetro) queda absorbida en parte por las capas superiores y, a su vez, cada capa absorbe parte de las emisiones ascendentes procedentes de las capas inferiores.

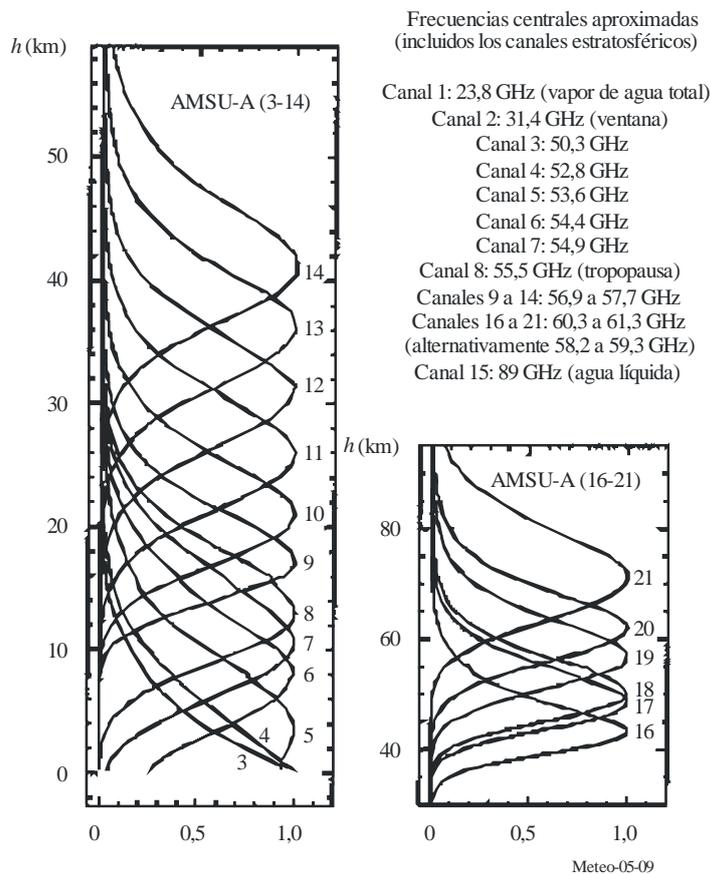
La integración de la ecuación de transferencia de la energía radiativa a lo largo del trayecto desde la superficie terrestre al satélite refleja este mecanismo y se traduce en una función de ponderación que describe la contribución relativa de cada capa atmosférica en función de su altitud que representa asimismo la resolución longitudinal (vertical) del sensor.

La cresta de la función de ponderación puede presentarse a cualquier altitud y depende del índice de absorción a la frecuencia considerada. Si en una frecuencia la absorción es baja, la cresta estará próxima a la superficie terrestre. Si en una frecuencia la absorción es alta, la cresta estará próxima al límite superior de la atmósfera. Las sondas incorporan varios canales de frecuencia (véase, por ejemplo, la Figura 5-9). Éstos se seleccionan con el mayor esmero dentro de la banda de absorción para cubrir una amplia gama de niveles de absorción a fin de obtener las mejores muestras atmosféricas posibles desde la superficie hasta altitudes estratosféricas.

Las funciones de ponderación típicas para una sonda de temperatura de microondas funcionando en la banda de 60 GHz se muestran en la Figura 5-9.

FIGURA 5-9

### Funciones de ponderación típicas para una sonda de temperatura de microondas funcionando cerca de 60 Hz



Debe señalarse además la especial importancia de los canales 1 (23,8 GHz), 2 (31,5 GHz) y 15 (90 GHz) (no indicados en la Figura 5-9). Se trata de canales auxiliares que juegan un papel primordial en el proceso de recuperación de mediciones efectuadas en el espectro de absorción del  $O_2$ . Por este motivo, deben tener geometrías y calidades de funcionamiento radiométrico semejantes y deben recibir una protección análoga contra la interferencia.

- el canal 1 está próximo a la cresta de absorción del  $H_2O$ . Se utiliza para recuperar el contenido total de vapor de agua a lo largo de la línea de visibilidad directa y para determinar las correcciones necesarias en los demás canales;

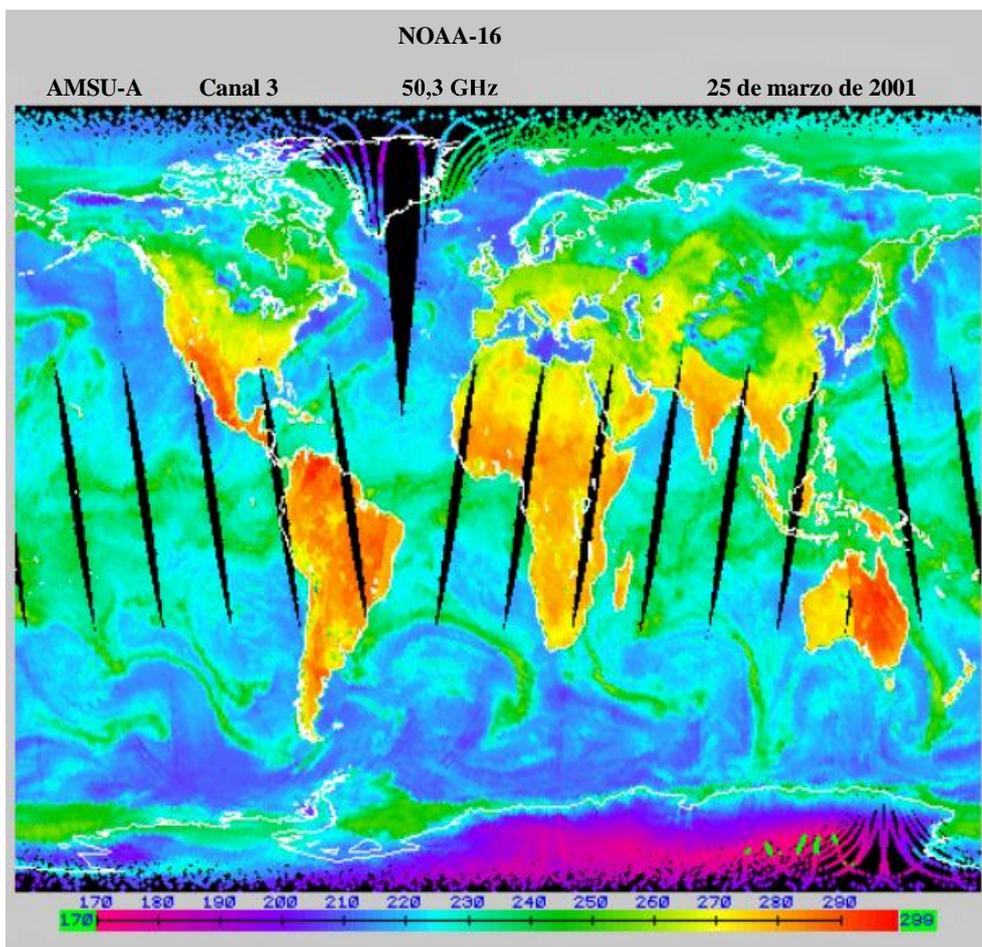
- el canal 2 es el que presenta menos efectos acumulativos debidos al oxígeno del vapor de agua. Se trata del canal ventana óptimo para observar la superficie terrestre y es la referencia para los demás canales; y
- el canal 15 puede detectar el agua líquida en la atmósfera y se utiliza para depurar las mediciones efectuadas en los demás canales de los efectos de las precipitaciones.

### 5.2.7.3 Utilización del sondeo atmosférico vertical

Los perfiles verticales de temperatura y humedad se utilizan básicamente como entrada a los modelos numéricos de predicción meteorológica (NWP, *numerical weather prediction*), que necesitan inicializarse cada 6 h como mínimo. Los modelos NWP mundiales se utilizan para obtener predicciones meteorológicas con una anticipación de 5 a 10 días y una resolución geográfica de unos 10 km. Asimismo, hay cada vez más modelos regionales y locales para la predicción a un nivel más detallado (unos km) a corto plazo (de 6 a 48 h). La Figura 5-10 muestra las mediciones de la temperatura (K) a partir del sensor pasivo de microondas, AMSU-A, realizadas en un periodo de tiempo de 12 h aproximadamente. Las observaciones incluyen la emisión y la reflexión de la superficie más la emisión del oxígeno principalmente en los primeros 5 km por encima de la superficie (véase la Figura 5-9).

FIGURA 5-10

Composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) obtenidas del AMSU-A



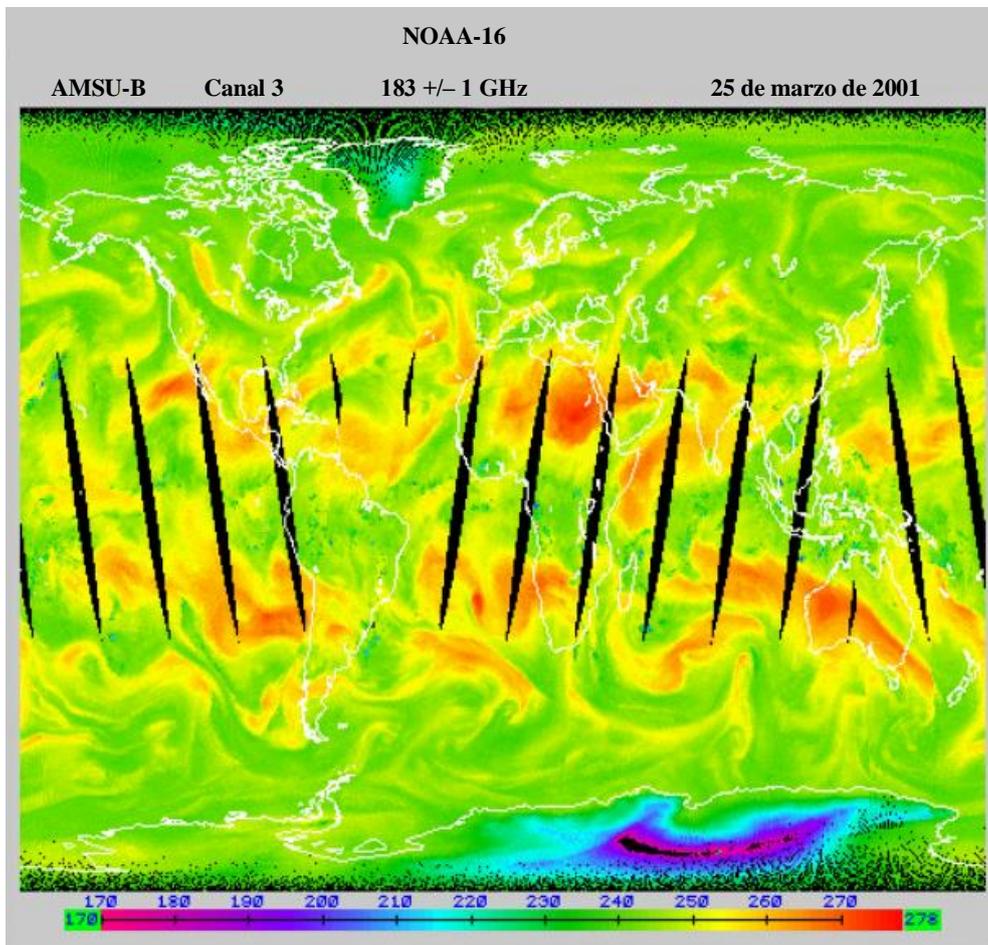
Meteo-05-10

La Figura 5-11 muestra la composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) obtenidas del AMSU-B, contiene las mediciones obtenidas en un periodo de tiempo de 12 h aproximadamente. El AMSU-B es un radiómetro explotado conjuntamente con AMSU-A para mejorar la detección del vapor de agua troposférico. A 183 GHz, el radiómetro observa una temperatura elevada (entre naranja y rojo) en los trópicos y en las latitudes medias cuando las partes superiores de la troposfera están secas y las observaciones del sensor se aproximan a la superficie, y temperaturas de escaso brillo (verde) cuando la humedad es elevada y la radiación se origina en los niveles altos.

Los modelos NWP utilizan ecuaciones diferenciales parciales Navier-Stokes. Debido a que estos modelos simulan mecanismos atmosféricos de gran inestabilidad, resultan extremadamente sensibles a la calidad de la determinación inicial de perfiles tridimensionales. Este problema ha sido descrito por Lorentz y ha quedado totalmente explicado por la «teoría del caos». Para ejecutar los modelos NWP, se necesitan los superordenadores más potentes.

FIGURA 5-11

#### Composición mundial de las mediciones de la temperatura (K) obtenidas del AMSU-B



Meteo-05-11

Para aumentar la eficacia de los modelos NWP, será necesario mejorar y aumentar la inicialización de los modelos cada 6 h como mínimo, a nivel mundial y con una resolución de 50 km para los NWP mundiales y de 10 km para los NWP regionales o locales. En el futuro, habrá que obtener la información para obtener la inicialización de los modelos NWP aproximadamente cada tres horas.

#### 5.2.7.4 Características de los sensores pasivos orientados al nadir funcionando en la gama de 60 GHz

La mayor parte de los sensores de microondas pasivos diseñados para la medición de parámetros troposféricos y estratosféricos son instrumentos orientados al nadir. Utilizan una configuración de exploración mecánica transversal a la trayectoria (los actuales) o de barrido transversal (los futuros) en un plano normal a la velocidad del satélite que contiene la dirección del nadir. Esta configuración proporciona el campo de visión óptimo (FOV, *optimum field-of-view*) y la calidad media de datos óptima. El Cuadro 5-2 resume las características típicas de las sondas de temperatura que funcionan en torno a 60 GHz a bordo de satélites en órbita terrestre baja.

CUADRO 5-2

#### Características típicas de las sondas verticales de microondas en torno a 60 GHz

Característica	Exploración mecánica (actual)	Exploración de barrido transversal (futura)
Anchura de banda del canal (MHz)	400	15
Tiempo de integración (s)	0,2	2,45
Diámetro de la antena (cm)	15	45
Puntos de 3 dB en el FOV instantáneo (grados)	3,3	1,1
Campo de visión transversal a la trayectoria (grados)	±50	±50
Ganancia de la antena (dBi)	36	45
Ganancia de lóbulo (dBi)	-10	-10
Eficacia del haz (%)	> 95	> 95
Resolución radiométrica (K)	0,3	0,1
Anchura de la zona de exploración (km)	2 300	2 300
Tamaño del píxel del nadir (km)	49	16
Número de píxeles/línea	30	90

#### 5.2.7.5 Sondas pasivas de limbo de microondas

Las sondas de limbo de microondas (MLS, *microwave limb sounders*), que observan la atmósfera en direcciones tangenciales a las capas atmosféricas se utilizan para estudiar desde la región atmosféricas baja a la superior, donde las intensas actividades fotoquímicas pueden ejercer gran influencia en el clima terrestre. Las características más importantes de las mediciones tangenciales de la emisión del limbo son las siguientes:

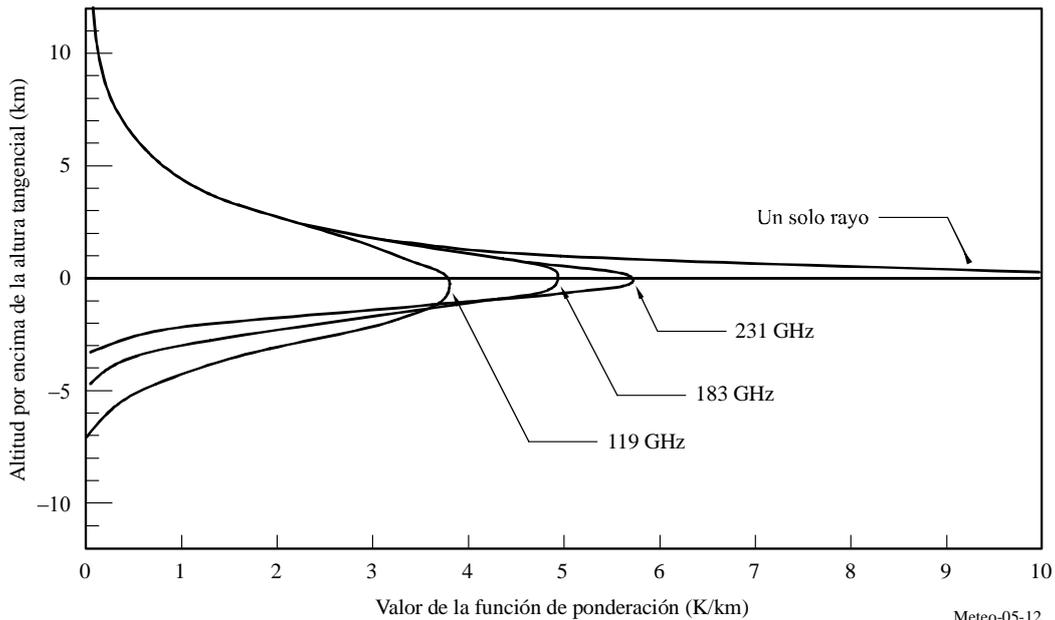
- se utiliza el trayecto más largo, lo que maximiza las señales procedentes de los componentes atmosféricos de menor importancia y baja concentración, y permite efectuar sondeos a gran altitud;
- la resolución vertical se determina por la transferencia de energía radiativa a través de la atmósfera y por el campo de visión vertical de la antena. La Figura 5-12 muestra un ejemplo característico;
- la resolución horizontal normal a la línea de visibilidad directa se determina principalmente por el campo de visión horizontal de la antena y por el arrastre corto provocado por el movimiento del satélite;
- la resolución horizontal a lo largo de la línea de visibilidad directa se determina principalmente por la transferencia de energía radiativa a través de la atmósfera;
- el fondo espacial es óptimo para el calibrado de la medición de las emisiones;
- las mediciones del limbo son extremadamente vulnerables a las interferencias provocadas por los enlaces entre satélites.

Las sondas de limbo de microondas fueron lanzadas por primera vez en 1991 para ejecutar las siguientes funciones:

- la exploración vertical de la atmósfera en el intervalo 15-120 km de altitud, en dos direcciones ortogonales de radiación lateral;
- la resolución vertical típica para las mediciones de los perfiles (anchuras de las funciones de ponderación a su valor mitad) es de 3 a 6 km, aproximadamente, como se muestra en la Figura 5-12;
- la resolución horizontal típica es de 30 km a lo ancho y 300 km a lo largo de la dirección de observación;
- se obtienen perfiles completos en menos de 50 s; y
- se observa la emisión térmica del limbo en cinco regiones espectrales de microondas (véase el Cuadro 5-3).

FIGURA 5-12

**Función de ponderación vertical de las sondas de limbo de microondas  
(basadas en una antena de 1,6 m a 600 km de altitud)**



CUADRO 5-3

**Ejemplo de objetivos de las mediciones de las sondas de limbo de microondas típicas y regiones espectrales**

Parámetro geofísico	Región espectral (GHz)	Altitud (km)	Ruido eficaz (intervalo de tiempo)
Presión atmosférica	63	30-70	1% (2 s)
Velocidad del viento	119	70-110	2-10 m/s (10 s)
Temperatura		20-100	0.5-3 K (2 s)
O <sub>2</sub>		80-120	$3 \times 10^{-3}$ v/v (2 s)
Campo magnético		80-110	0,3-1 m gauss (10 s)
H <sub>2</sub> O	183	15-90	$1 \times 10^{-7}$ v/v (2 s)
ClO	205	20-40	$2 \times 10^{-10}$ v/v (10 s)
O <sub>3</sub>		15-90	$1 \times 10^{-8}$ v/v (2 s)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		20-50	$9 \times 10^{-10}$ v/v (10 s)
O <sub>3</sub>	231	15-90	$1 \times 10^{-8}$ v/v (2 s)
CO		15-100	$1 \times 10^{-7}$ v/v (10 s)

La nueva generación de sondas de limbo de microondas mide las temperaturas estratosféricas más bajas y las concentraciones de H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, ClO, BrO, HCl, OH, HO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCN y N<sub>2</sub>O, por sus efectos sobre la disminución de la capa de ozono, la transformación de los gases que producen el efecto invernadero y el condicionamiento radiativo del cambio climático, así como el diagnóstico de estos efectos. Las MLS miden asimismo el H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CO y HCN de las capas troposféricas superiores por sus efectos sobre el condicionamiento radiativo del cambio climático y para diagnosticar el intercambio entre la troposfera y la estratosfera.

Las sondas de limbo de microondas observan los detalles de la química del ozono midiendo muchos radicales, reservas y focos de gases en los procesos químicos que destruyen el ozono. Este conjunto de mediciones proporcionará pruebas estrictas para la comprensión de la química estratosférica mundial, contribuirá a explicar las tendencias observadas en el ozono y podrá alertar anticipadamente de los cambios que se produzcan en la química de esta región.

Las sondas de limbo de microondas originales han demostrado su capacidad para medir los perfiles de vapor de agua de la capa superior de la troposfera. Este conocimiento es indispensable para la comprensión de la variabilidad climática y del calentamiento de la Tierra, cuya observación con garantías a escala mundial era extremadamente difícil hasta la fecha.

Las futuras sondas de limbo de microondas podrán efectuar observaciones de componentes y especies químicas atmosféricas adicionales a otras frecuencias.

### 5.2.7.6 Vulnerabilidad de las ondas pasivas de microondas a la interferencia

Los sensores pasivos integran todas las emisiones naturales (deseadas) y artificiales (no deseadas). Normalmente, no pueden diferenciar entre estos tipos de señales pues la atmósfera es un medio extremadamente inestable cuyas características varían con gran velocidad, tanto en el espacio como en el tiempo. Un problema particular para los sensores pasivos es la presencia de un gran número de emisores de baja potencia en el interior de la zona de medición del sensor. Entre estos emisores de baja potencia se encuentran los dispositivos de banda ultraamplia (UWB), los dispositivos para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM) y los dispositivos de corto alcance (SRD). La situación es cada vez más crítica porque está aumentando la densidad de estos dispositivos activos terrenales y ya hay casos en que se ha informado de la aparición de interferencia perjudicial.

Las mediciones de sensores pasivos, por consiguiente, son extremadamente vulnerables a la interferencia, incluso con niveles muy bajos de potencia, lo que puede provocar graves perjuicios.

- Se ha demostrado que con sólo el 0,1% de muestras de datos de satélites contaminadas podrían generarse errores inaceptables en las predicciones meteorológicas numéricas, provocando la desaparición de la confianza en estas singulares mediciones pasivas válidas para cualquier clima.
- La supresión sistemática de datos cuando aumenta la probabilidad de interferencia (si es detectable) puede provocar la pérdida de indicaciones vitales de tormentas de rápida evolución potencialmente peligrosas e imposibilitar la realización de nuevos sistemas meteorológicos en desarrollo.
- Si la interferencia tiene un nivel de potencia suficientemente bajo para no ser detectada, lo cual es más que probable, los datos contaminados se tomarán como datos válidos y las conclusiones obtenidas de los análisis que contienen estos datos serán muy erróneas.
- En los estudios climatológicos y especialmente en la supervisión del cambio climático mundial, la interferencia puede hacer que se interpreten erróneamente las señales climáticas.

La Recomendación UIT-R RS.2017 proporciona, la calidad de funcionamiento radiométrica requerida y el nivel de interferencia admisible por debajo del cual se puede obtener la calidad de funcionamiento requerida.

## 5.3 Sensores activos

### 5.3.1 Introducción

El objeto de este punto es la descripción de las necesidades de frecuencias del espectro radioeléctrico que tienen los sensores activos a bordo de vehículos espaciales, especialmente los utilizados en la supervisión de los fenómenos meteorológicos. Se pretende presentar los tipos de sensores y las características de los mismos que determinan sus necesidades específicas de frecuencias; se pretende asimismo exponer los criterios necesarios de calidad de funcionamiento y de interferencia para los estudios de compatibilidad con otros servicios en las bandas de frecuencias de interés, exponiendo asimismo el estado actual de los estudios que se realizan sobre la compatibilidad de los sensores activos en plataformas espaciales con otros servicios, así como otras cuestiones y asuntos de interés.

En este Manual se contemplan cinco tipos principales de sensores activos a bordo de vehículos espaciales:

*Tipo 1: Radars de abertura sintética (SAR, synthetic aperture radars)* – Sensores orientados hacia un lado de la trayectoria del nadir, reuniendo la historia en fase y tiempo del eco coherente del radar a partir del cual suele generarse una imagen de radar de la superficie terrestre.

*Tipo 2: Altimetros* – Sensores orientados al nadir, midiendo el tiempo exacto entre un evento de transmisión y uno de recepción, para obtener la altitud exacta de la superficie del océano terrestre, incluidas aguas costeras y fluviales.

*Tipo 3: Dispersímetros* – Sensores orientados en diversos ángulos de presentación a los lados del trayecto del nadir, utilizando la medición de la variación de potencia del eco devuelto con el ángulo de presentación para determinar la dirección y la velocidad del viento en la superficie de los océanos terrestres, incluidas aguas costeras y fluviales. La retrodispersión también se utiliza para estudiar todas las superficies terrestres y proporciona datos sobre las condiciones de la superficie terrestre tales como la humedad del suelo y la lluvia sobre superficies terrestres.

*Tipo 4: Radars de precipitación* – Sensores de exploración perpendicular a la trayectoria del nadir que miden el eco del radar de las precipitaciones, para determinar el índice de pluviosidad sobre la superficie terrestre y la estructura tridimensional de la lluvia.

*Tipo 5: Radars de perfil de nubes* – Sensores orientados al nadir que miden el eco del radar devuelto por las nubes para determinar los perfiles de reflectividad de las nubes sobre la superficie terrestre.

El Cuadro 5-4 resume las características de los cinco tipos principales de sensores activos a bordo de vehículos espaciales.

CUADRO 5-4

## Características de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales

Características	Tipos de sensor				
	SAR	Altímetro	Dispersímetro	Radares de precipitación	Radares de perfil de nubes
Geometría de la observación	Orientación lateral con una separación de 10°-55° del nadir	Orientación al nadir Orientación hacia múltiples incidencias	– Tres/seis haces acimutales en abanico – Uno o más haces cónicos de exploración	Exploración transversal en torno a la trayectoria del nadir	Orientado al nadir
Dinámica de la huella del haz	– Fija a un lado – ScanSAR – Puntual	Fija en el nadir Orientación hacia múltiples incidencias	– Fija en acimut – Múltiples haces cónicos de exploración	Exploración transversal a la trayectoria del nadir	Fija en el nadir
Haz de la antena	Haz en abanico	Haz puntual	– Haces en abanico – Haces puntual	Haz puntual	Haz puntual
Potencia de cresta radiada (W)	1 500-8 000	20	100-5 000	600	1 000-1 500
Forma de onda	Impulsos con FM lineal	Impulsos con FM lineal	Onda continua interrumpida o impulsos cortos (océano) o impulsos FM lineales (tierra)	Impulsos cortos	Impulsos cortos
Anchura de banda	20-1 200 MHz	320/500 MHz	5-80 kHz (océano) o 1-4 MHz (tierra)	14 MHz	300 kHz
Factor de duración de los impulsos (%)	1-30	46	31 (océano) o 10 (tierra)	0,9	1-14
Zona de servicio	Tierra/costera/océano	Océano/hielo/costera/aguas fluviales	Océano/hielo/tierra/costas	Tierra/océano	Tierra/océano
Bandas de frecuencia típicas	1,3 GHz, 5 GHz, 9 GHz y 36 GHz	5 GHz, 13 GHz y 36 GHz	1,3 GHz, 5 GHz y 13 GHz	36 GHz y 78 GHz	94 GHz, 138 GHz y 238 GHz

### 5.3.2 Radares de abertura sintética (SAR)

Los SAR proporcionan imágenes de radar de la superficie terrestre. La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie terrestre con el campo electromagnético. La anchura de banda de RF afecta a la resolución de los píxeles de imagen. En la Figura 5-13a) se muestra el impulso modulado linealmente en frecuencia y a continuación la anchura de banda de RF correspondiente. La resolución de la determinación de distancia es igual a  $c/2/(BW \sin \theta)$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz,  $BW$  la anchura de banda de RF y  $\theta$  el ángulo de incidencia. Para obtener una resolución en la determinación de distancia de 1 m con un ángulo de incidencia de 30°, por ejemplo, la anchura de banda de RF debe ser de 300 MHz. Muchos SAR efectúan el barrido a un lado del vector velocidad, como se puede ver en la Figura 5-13b). Las fuentes de interferencia que puedan existir en la zona de barrido iluminada se devolverán al receptor SAR y degradarán la calidad del píxel de imagen. La degradación admisible de la calidad del píxel de imagen determina el nivel de interferencia admisible. La Figura 5-14 muestra una imagen del Mar Muerto entre Israel y Jordania.

FIGURA 5-13

**Espectro del impulso modulado linealmente en frecuencia y zona de iluminación del SAR**

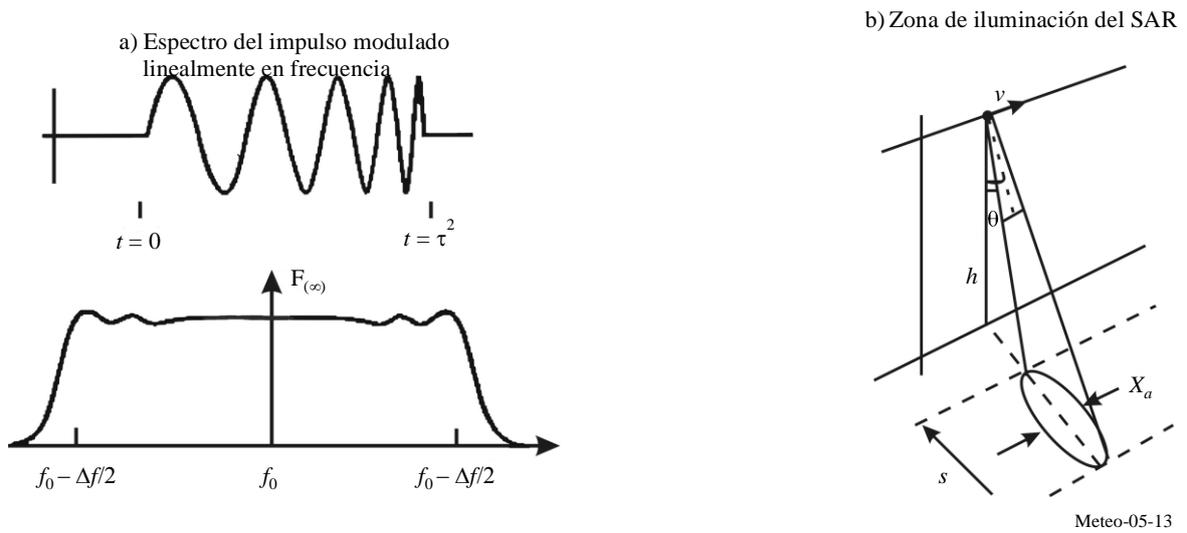


FIGURA 5-14

**Imagen SAR de la ribera occidental del Mar Muerto entre Israel y Jordania**

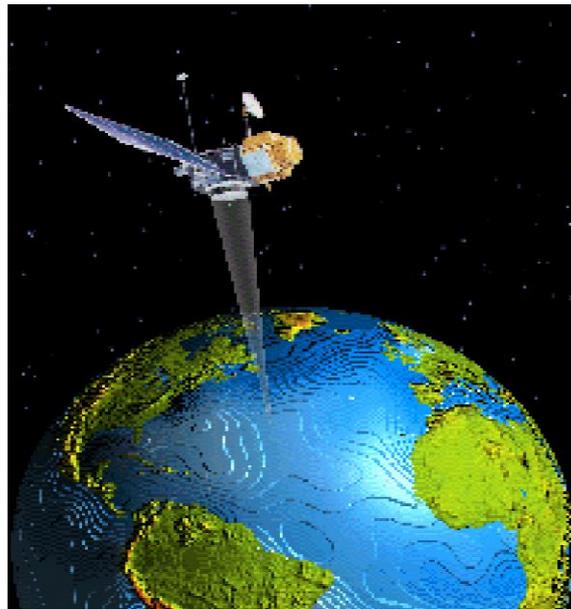
Meteo-05-14

**5.3.3 Altimetros**

Los altímetros miden la altitud de la superficie de los océanos terrestres. Las Figuras 5-15, 5-16a) y 5-16b) son una ilustración de un altímetro de satélite y de su precisión de medición típica. La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie del océano con el campo electromagnético. El funcionamiento en doble frecuencia permite compensar el retardo ionosférico. Por ejemplo, la utilización de frecuencias en torno a 13,6 GHz y 5,3 GHz ilustra una posible disposición de doble frecuencia. La anchura de banda en RF afecta a la precisión de la medición de la altitud. La precisión diferencial de tiempo  $\Delta t$  es inversamente proporcional a BW, siendo BW la anchura de banda en RF. La degradación permisible en la precisión de la altitud determina el nivel de interferencia admisible. Algunos altímetros de satélite han medido la topografía de los océanos con una precisión de 4,2 cm. La degradación aceptable de la calidad de funcionamiento estipulada en la Recomendación UIT-R RS.1166-4 es del 4%.

FIGURA 5-15

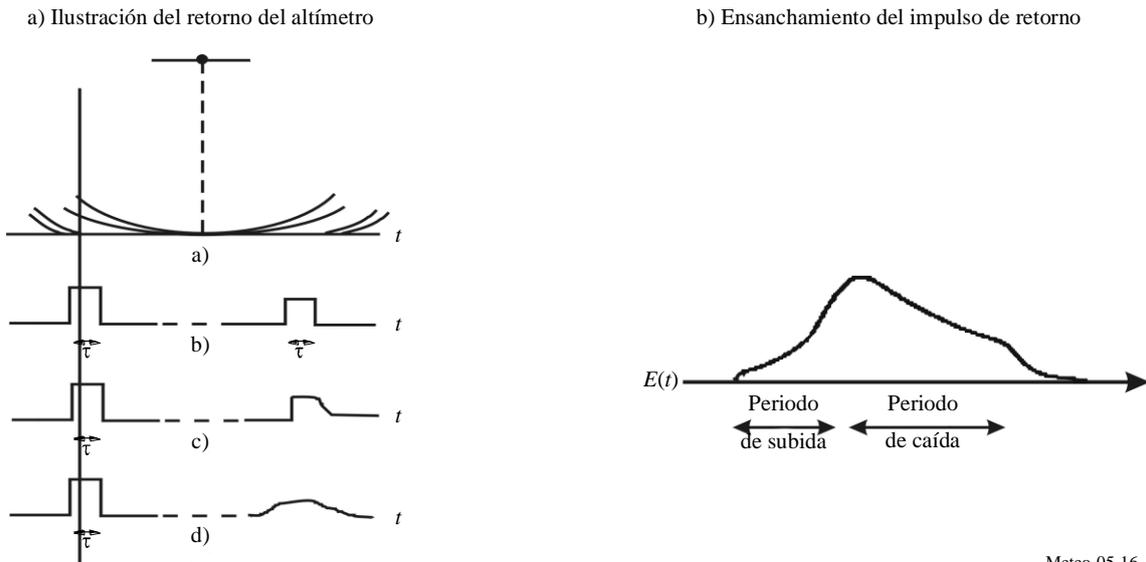
**Altímetro de satélite de microondas**



Meteo-05-15

FIGURA 5-16

**Ilustración del retorno del altímetro y ensanchamiento del impulso de retorno**



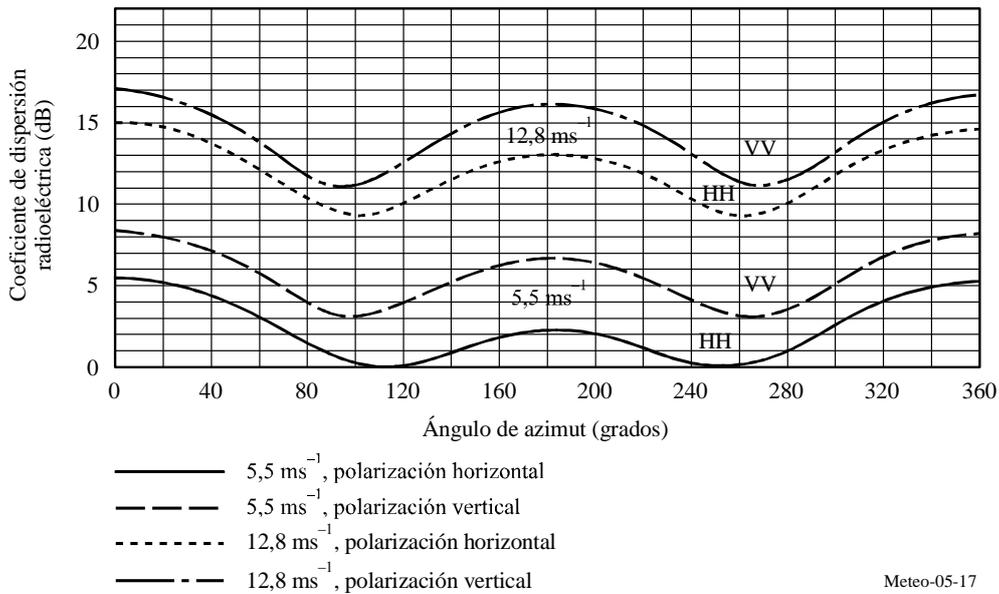
Meteo-05-16

**5.3.4 Dispersímetros**

Los dispersímetros proporcionan esencialmente mediciones de la dirección y velocidad del viento sobre la superficie de los océanos de la Tierra, y de la extensión y las características del hielo marino. La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie oceánica con el campo electromagnético y su variación con el ángulo de presentación. La Figura 5-17 muestra la variación del nivel de retrodispersión con el ángulo de presentación en relación a la dirección del vector velocidad del viento.

FIGURA 5-17

Variación de la retrodispersión con el ángulo de presentación



Como muestra la Figura 5-18, un dispersímetro típico ilumina la superficie de la Tierra bajo varios ángulos de presentación fijos. En la Figura 5-19 el haz explorador puntual del dispersímetro efectúa un barrido en dos ángulos diferentes respecto al nadir y explora 360 grados en acimut alrededor del nadir. La pequeña anchura de banda de la señal de RF proporciona la resolución de la célula de medición necesaria.

FIGURA 5-18

Huella fija del dispersímetro

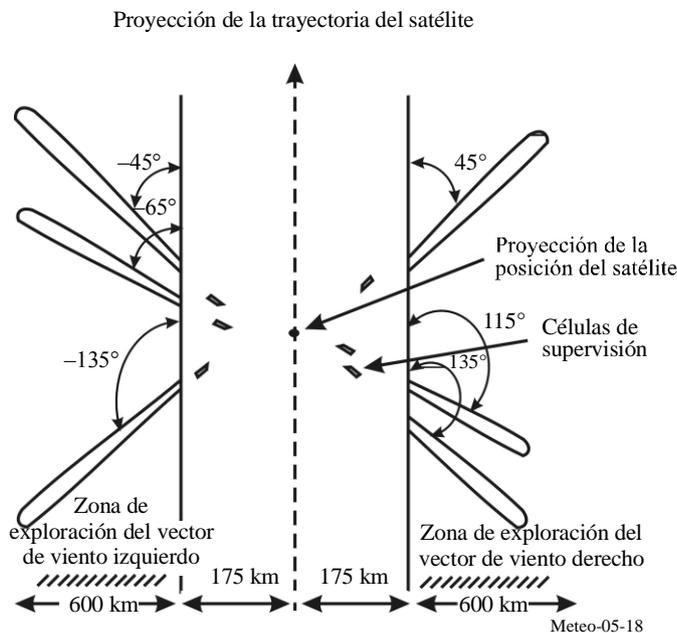
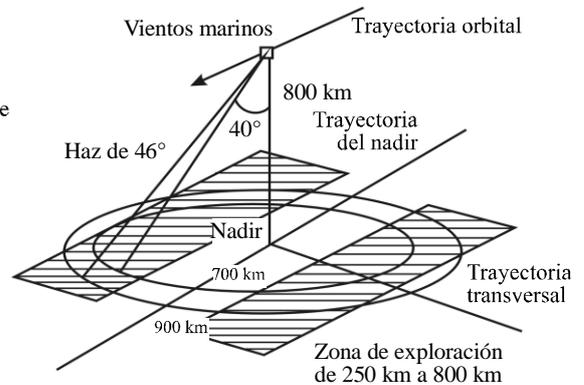


FIGURA 5-19

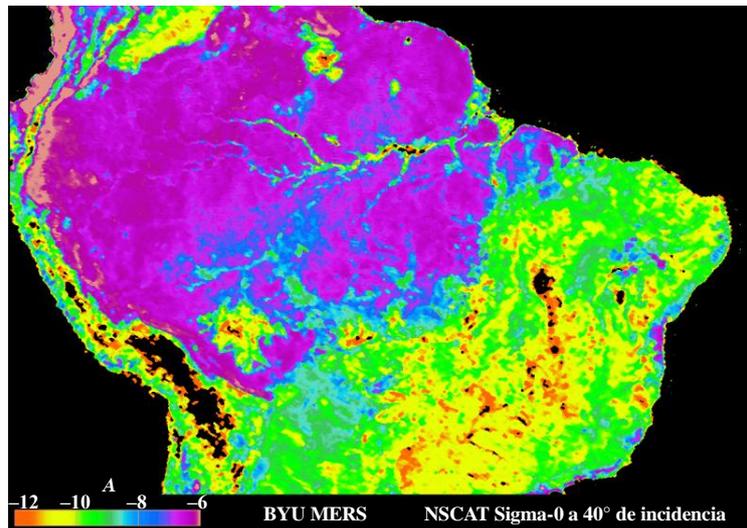
Exploración por haz puntual del dispersímetro



La función principal del dispersímetro es estudiar vientos oceánicos, pero los científicos han concebido una manera de estudiar cambios de la retrodispersión del radar del instrumento para mirar también todas las superficies terrestres y proporcionar así condiciones de la superficie terrestre tales como humedad del suelo y lluvias sobre la tierra. La Figura 5-20 muestra un ejemplo de imagen de radar de la selva amazónica en América del Sur, realizada por el dispersímetro NSCAT. El radar del dispersímetro es sensible a las condiciones en la superficie de la Tierra, tales como el tipo y la densidad de vegetación.

FIGURA 5-20

**Imagen de la selva amazónica en América del Sur  
realizada por el radar dispersímetro NSCAT**



### 5.3.5 Radares de precipitación

Los radares de precipitación suministran mediciones de los índices de precipitación de la superficie terrestre, centrándose típicamente en la pluviosidad de los trópicos.

La elección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la precipitación con el campo electromagnético. La sección transversal de retrodispersión de un meteoro acuoso esférico es:

$$\sigma_b = \pi^5 |K_W|^2 D^6 / \lambda^4 = \pi^5 |K_W|^2 Z / \lambda^4 \quad (5-4)$$

siendo:

$|K_W|^2$ : función del índice de refracción de las gotas de agua

$D$ : diámetro de las gotas de agua (m)

$\lambda$ : longitud de onda del radar (m)

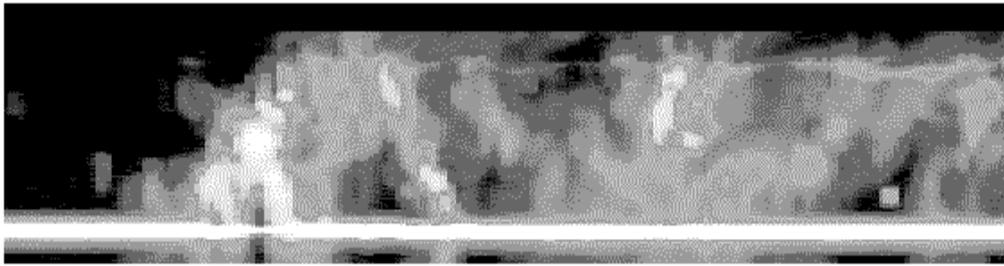
$Z$ : factor de reflectividad del radar.

La retrodispersión aumenta con la cuarta potencia de la frecuencia de RF.

La Figura 5-21 muestra un ejemplo de sección vertical del factor de reflectividad del radar. La pequeña anchura del impulso de la señal de RF proporciona la resolución necesaria para la medición de la distancia. Un ejemplo de radar de precipitación utiliza una anchura de impulso de 1,6  $\mu$ s, aunque este valor puede variar con otros sistemas. La degradación mínima permisible de la reflectividad de la precipitación determina el nivel de interferencia admisible.

FIGURA 5-21

**Reflectividad sintetizada a partir de mediciones de la reflectividad**



Meteo-05-21

**5.3.6 Radares de perfil de nubes**

Los radares de perfil de nubes proporcionan un perfil tridimensional de la reflectividad de las nubes en la superficie terrestre. La Figura 5-22 muestra un ejemplo representativo de la reflectividad por retrodispersión en función de la altitud.

La selección de la frecuencia central de RF depende de la interacción de la superficie oceánica con el campo electromagnético y su variación en función del ángulo de presentación.

La ecuación (5-5) es la expresión que permite calcular el nivel de potencia devuelto por las nubes.

$$\tilde{P} = \frac{\pi^5 10^{-17} P_r G^2 t \theta_r^2 |K_W|^2 Z_r}{6,75 \times 2^{14} (\ln 2) r_0^2 \lambda^2 l^2 l_r} \quad \text{mW} \quad (5-5)$$

donde:

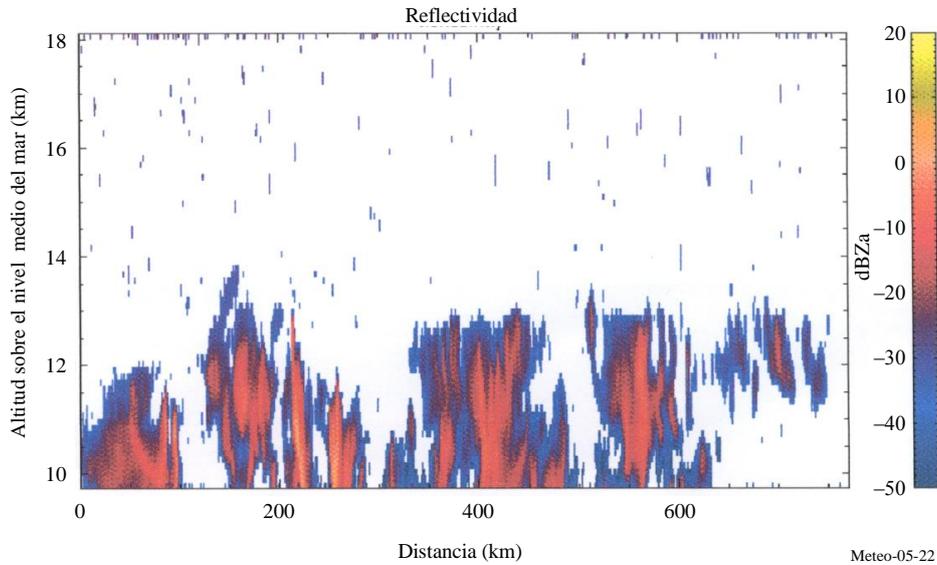
- $\tilde{P}$  : nivel de potencia devuelta por las nubes (mW)
- $P_r$  : potencia de transmisión del radar (W)
- $G$  : ganancia de la antena (numérica)
- $t$  : anchura del impulso ( $\mu\text{s}$ )
- $\theta_r$  : anchura del haz de la antena de 3 dB (grados)
- $K_W$  : factor dieléctrico del contenido de agua de la nube
- $Z_r$  : factor de reflectividad de la nube ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )
- $r_0$  : alcance (km)
- $\lambda$  : longitud de onda del radar (cm)
- $l$  : pérdida de la señal debida a la absorción atmosférica
- $l_r$  : pérdidas del sistema de radar.

Como indica esta ecuación, la potencia devuelta disminuye con el cuadrado de la longitud de onda. Dado que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda, la potencia devuelta aumenta con el cuadrado de la frecuencia de RF. En el caso de partículas pequeñas (en régimen de Rayleigh) la potencia devuelta aumenta con la frecuencia elevada a la cuarta potencia puesto que el índice depende del tamaño relativo de las partículas respecto a la longitud de onda. Las antenas de los radares de perfil de nubes tienen lóbulos laterales muy pequeños con objeto de aislar el retorno de la nube del retorno de la superficie iluminada por los lóbulos laterales, que es más intenso.

FIGURA 5-22

**Ejemplo de la reflectividad de los cirros**

Cirros tropicales observados durante el tránsito de Hawai a Nueva Zelanda



**5.3.7 Criterios de interferencia y de calidad de funcionamiento de los sensores**

Los criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia admisible para los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales figuran en la Recomendación UIT-R RS.1166, que se revisa periódicamente para reflejar modificaciones de la reglamentación, tales como una nueva atribución al SETS (activo) y sensores más recientes que afectarían los criterios actuales de calidad de funcionamiento e interferencia admisible.

**5.3.8 Niveles de densidad de flujo de potencia (dfp)**

Las características de los diversos tipos de sensores activos a bordo de vehículos espaciales mostrados en el Cuadro 5-4 indican que la potencia de cresta transmitida, y por consiguiente los niveles de potencia recibidos en la superficie terrestre, variarán significativamente de nivel. El Cuadro 5-5 muestra los niveles de la densidad de flujo de potencia del sensor activo en la superficie terrestre para algunas configuraciones de sensores típicas.

CUADRO 5-5

Niveles típicos de densidad de flujo de potencia en la superficie terrestre

Parámetro	Tipo de sensor				
	SAR	Altímetro	Dispersímetro	Radares de precipitación	Radares de perfil de nubes
Potencia radiada (W)	1 500	20	100	578	630
Ganancia de la antena (dB)	36,4	43,3	34	47,7	63,4
Distancia (km)	695	1 344	1 145	350	400
DFP (dB(W/m <sup>2</sup> ))	-59,67	-77,25	-78,17	-46,55	-31,64

## CAPÍTULO 6

**OTROS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES  
PARA ACTIVIDADES METEOROLÓGICAS**

	<i>Página</i>
6.1 Introducción .....	106
6.2 Sistemas de divulgación.....	106
6.3 Sistemas hidrológicos .....	106
6.4 Radiocomunicaciones para sistemas meteorológicos y medioambientales remotos.....	107
6.5 Usos meteorológicos de los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) .....	107
6.6 Sistemas de detección de rayos .....	109
6.7 Teledetección desde tierra.....	111
6.8 Sistemas de aeronaves no tripuladas .....	112

## 6.1 Introducción

De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 1 los servicios meteorológicos necesitan reunir observaciones de muchos lugares remotos, tanto en tierra como en el mar. Así pues, los sistemas de observación meteorológica dependen de muchos otros servicios de radiocomunicaciones además de los servicios MetSat, MetAids, radiolocalización y SETS descritos en los anteriores Capítulos.

Es asimismo indispensable que los meteorólogos transmitan la información y los avisos a los clientes lo antes posible, ya sea en zonas densamente pobladas o en zonas distantes escasamente pobladas. Además, los servicios meteorológicos dan soporte a las operaciones marítimas y aeronáuticas en todo el mundo. Para ello, los sistemas de divulgación de productos meteorológicos utilizan una gran variedad de servicios de radiocomunicaciones.

## 6.2 Sistemas de divulgación

La divulgación de predicciones meteorológicas tiene la misma importancia que la captura y archivo de los datos meteorológicos. Poner esas predicciones al alcance de la población es un requisito esencial para salvar vidas a fin de que las personas adopten las medidas necesarias para la protección de sus vidas y bienes.

A lo largo de los años se han desarrollado sistemas de radiocomunicaciones especializados que hacen posible la distribución de las predicciones y demás datos meteorológicos. Entre los más sencillos se encuentra la radiodifusión sonora. Estos sistemas que utilizan típicamente las radiocomunicaciones en la banda de ondas métricas requieren la utilización de equipos sencillos por parte del público en general. Estos sistemas permiten alertar a la población de la amenaza de tormentas, inundaciones, temperaturas extremas y otros peligros naturales o provocados. Pueden realizarse mejoras tales como la transmisión de datos informativos accesible a las personas con problemas auditivos por medio de equipos especiales. Estos sistemas pueden diseñarse asimismo para proporcionar la distribución continua de datos o para permanecer en reposo hasta su activación por un tono de alerta que indique la presencia de un evento especial tal como mal tiempo u otro peligro inminente. Los sistemas de divulgación pueden basarse en servicios fijos y móviles, como el servicio móvil marítimo. Otros sistemas de divulgación utilizan la radiodifusión sonora, la televisión (terrenal y por satélite) y los enlaces descendentes del MetSat.

A lo largo de los años muchas administraciones han utilizado las radiocomunicaciones de alta frecuencia para la difusión de información meteorológica y de alertas a barcos y aviones. Estos sistemas suelen ofrecer transmisiones sonoras y facsímil meteorológico (WEFAX). No obstante, la escasa fiabilidad de las transmisiones en alta frecuencia ha provocado la migración de muchos de estos sistemas a las transmisiones por satélite.

Por último, cabe señalar que los sistemas del servicio fijo por satélite, a través de las cargas útiles comerciales en la banda C ((3 400-4 200 MHz) y la banda Ku (10 700-11 700 MHz)), se utilizan hoy en todo el mundo para divulgar información relativa al clima, a los fenómenos meteorológicos y a los recursos hídricos, incluidas las alertas de catástrofe a las agencias de meteorología y a las comunidades de usuarios. El empleo de **satélites en la banda C** es especialmente importante en zonas donde las condiciones de propagación (por ejemplo, lluvias torrenciales en zonas tropicales y ecuatoriales) hacen imposible la utilización de cualquier otro medio de telecomunicación.

## 6.3 Sistemas hidrológicos

En gran parte del mundo las inundaciones son parte natural de la vida inevitablemente y los sistemas de ayuda a la predicción de las mismas, de su situación y magnitud han salvado muchas vidas y muchos bienes. El conocimiento anticipado de las mismas permite la evacuación de las poblaciones en peligro, la construcción de diques y presas y la reubicación de los bienes y valores vulnerables que puedan ser trasladados.

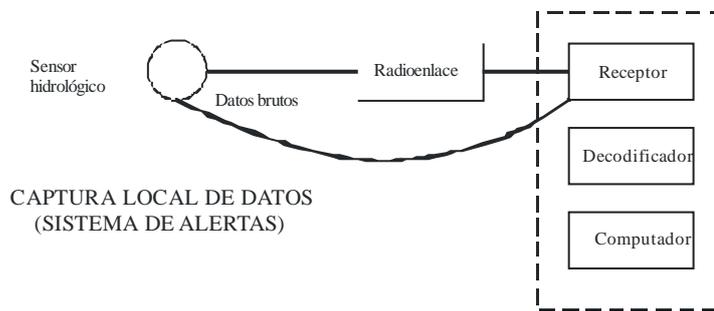
Para completar las redes de radares meteorológicas (véase el Capítulo 4) que son indispensables en el proceso hidrológico, también se utilizan sistemas hidrológicos específicos para medir la precipitación, la altura de la corriente y la profundidad del manto de nieve que son necesarias para la predicción y alerta temprana de inundaciones. También son útiles para el cálculo de la disponibilidad de recursos hídricos.

El valor medio de los daños provocados cada año por las inundaciones sólo en Estados Unidos de América se aproxima a los 4000 millones USD. Las comunidades con problemas de inundaciones recurrentes y las susceptibles de incurrir en grandes pérdidas cuando se presentan las inundaciones no cesan de buscar el modo de reducir al mínimo estas pérdidas. Los sistemas hidrológicos automáticos constituyen una solución atractiva por su bajo coste de explotación y porque pueden mejorar el funcionamiento de otros métodos destinados a mitigar los efectos de las inundaciones tales como la instalación de compuertas de aliviadero en embalses, la contratación de seguros contra inundaciones y la delimitación de las llanuras de inundación.

Un sistema hidrológico automatizado está integrado por un generador de informes de eventos, sensores meteorológicos e hidrológicos, equipos de radiocomunicaciones y programas y equipos informáticos. En su versión más sencilla, las señales codificadas se transmiten mediante equipos de radiocomunicaciones, normalmente utilizando las bandas de ondas métricas o decimétricas de los servicios fijo o móvil a una estación base, a menudo mediante repetidores (véase la Figura 6-1). La estación base recibe estas señales codificadas y las procesa convirtiéndolas en información hidrometeorológica útil visualizable o comunicada a un sistema de alarma a fin de notificar a las unidades de control de emergencias los criterios predefinidos vulnerados.

FIGURA 6-1

**Esquema de un sistema hidrológico**



Los datos de los sensores se procesan en instalaciones informáticas locales.  
 No hay comunicaciones dedicadas con otras instalaciones informáticas.  
 La zona de cobertura está limitada por el alcance radioeléctrico de los sensores y los radioenlaces. · Meteo-06-01

**6.4 Radiocomunicaciones para sistemas meteorológicos y medioambientales remotos**

Las características técnicas de estos sistemas, en particular sus frecuencias de funcionamiento, varían considerablemente, pudiendo utilizarse cualquier banda de RF meteorológica. Se suelen seleccionar en función de la anchura de banda necesaria, que a su vez depende del tipo y cantidad de información a transportar. Los sistemas remotos fijos se utilizan para muchos fines meteorológicos y funcionan en varias bandas de RF. Como su nombre indica, funcionan en atribuciones fijas. Entre los usos más característicos se pueden citar:

*Sistemas de conmutación por voz de los enlaces de conexión* para transmitir señales de control o datos a los transmisores de difusión de datos, que a menudo están ubicados en lugares remotos (por ejemplo en la cima de las montañas) a fin de aumentar al máximo su cobertura.

*Conexión remota con radares* para transmitir las señales de retorno a los radares desde éstos (que suelen estar emplazados en lugares remotos) al centro de proceso de datos. Los operadores utilizan también la RF para el telemando de los equipos de las instalaciones del radar.

*Captura de datos* para transmitir desde los emplazamientos remotos a los archivos o instalaciones informáticas centrales los datos capturados por los sensores hidrológicos y meteorológicos procedentes de la medición de la lluvia, el viento, la temperatura, la profundidad de la nieve, los temblores de tierra (para la detección y predicción de terremotos) u otros fenómenos naturales cualesquiera.

**6.5 Usos meteorológicos de los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS)**

Los meteorólogos utilizan las señales GPS que se transmiten actualmente en 1 575,42 MHz (designadas por L1) y 1 227,6 MHz (designadas por L2) (y las del GLONASS) para los siguientes fines:

- *Localización de plataformas móviles de observación meteorológica:* por ejemplo de radiosondas transportadas en globos atmosféricos, de radiosondas con paracaídas, aviones no tripulados con sensores meteorológicos (véase el Capítulo 3) y sistemas meteorológicos marinos tales como las boyas oceánicas.
  
- *Sincronización temporal de gran precisión:* entre los lugares de observación remotos, necesaria por ejemplo para los sistemas de detección de rayos (véase el § 6.5).
  
- *Medición del contenido total de vapor de agua de la atmósfera:* calculado a partir del retardo de fase de las señales GPS captadas por los receptores terrestres. El cálculo del contenido total de vapor de agua exige determinaciones muy precisas de la posición de los distintos satélites GPS y de la temporización de los relojes de los satélites. La posición del receptor en tierra debe conocerse asimismo con gran precisión. Los receptores GPS se suelen instalar en una plataforma fija adecuada para el seguimiento preciso de la posición de la superficie terrestre así como para el suministro de información meteorológica. Por consiguiente, las mediciones pueden constituir un subproducto de las observaciones geodésicas y sismológicas o efectuarse mediante sensores instalados específicamente por los meteorólogos. Los retardos de fase introducidos en la transmisión de la señal a través de la ionosfera se determinan a partir de las diferencias de retardo de fase entre dos frecuencias GPS, L1 y L2. Si se conocen la presión y la temperatura de la superficie, puede calcularse el retardo de fase hidrostático seco introducido por la atmósfera de modo que el retardo de fase remanente sea proporcional al contenido total de vapor de agua a lo largo del trayecto del satélite. El sensor GPS en la superficie terrestre recibe las señales GPS de muchas direcciones en un breve periodo de tiempo. De este modo, se puede calcular el contenido total de vapor de agua en la vertical así como los gradientes del contenido total de vapor de agua en la dirección horizontal en torno al sensor. Esta técnica es de importancia para los estudios de la propagación atmosférica ya que permite una medición directa del contenido total de vapor de agua a lo largo del trayecto oblicuo que une al receptor en tierra con el satélite. Véase asimismo [Coster y otros, 1997].
  
- *Medición de la temperatura y la humedad relativa en función de la altitud calculada a partir de las mediciones de ocultación espacial de las señales GPS:* en esta aplicación, un receptor situado en un satélite independiente capta señales de la constelación GPS que pasa por la atmósfera en incidencia rasante con la superficie terrestre. La refracción de las señales GPS se mide en un intervalo de altitud sobre la superficie terrestre. Esto permite calcular el índice de refracción del aire en función de la altitud. A niveles superiores, en la atmósfera central, la humedad relativa es muy baja y el índice de refracción del aire puede suponerse que es función directa de la temperatura. A niveles más próximos a la superficie, por debajo de la tropopausa, tanto la temperatura como la presión parcial del vapor de agua influyen en el índice de refracción. La presión parcial del vapor de agua puede calcularse si se conoce la temperatura a partir de otra fuente. Las mediciones de las variables meteorológicas efectuadas mediante esta técnica tienen una resolución vertical mejor que la de los radiómetros de sensores pasivos de orientación nadiral (véase el Capítulo 5) pero se promediarán para distancias relativamente largas en la dirección horizontal. Al igual que la medición del contenido total de vapor de agua, esta técnica exige una temporización muy exacta y el conocimiento de las posiciones de ambos satélites. Los receptores de los GNSS están proyectados para la próxima generación de satélites meteorológicos de órbita polar.

## 6.6 Sistemas de detección de rayos

La teledetección de la actividad de rayos es hoy una herramienta importante para atender las necesidades de los meteorólogos operacionales. Se van incorporando los requerimientos de los clientes a los productos que se diseñan para la utilización de los radares y satélites meteorológicos, y en muchos países desarrollados se les otorga una gran prioridad dada la necesidad de realizar automáticamente observaciones meteorológicas de superficie. El funcionamiento fiable de estos sistemas guarda una estrecha relación con los aspectos de la seguridad pública en tierra, mar y aire. La existencia de un servicio eficaz de predicción tiene una gran repercusión en la eficacia de las actividades comerciales y defensivas. La seguridad de los ingenieros que trabajan en líneas de transporte de energía y el personal que maneja explosivos constituyen ejemplos de actividades que se benefician de la eficacia de las predicciones de rayos.

La detección de los rayos es una actividad pasiva que supone la utilización de receptores de radio-comunicaciones para detectar los frentes de onda generados por la caída de los rayos. Los datos procedentes de las ubicaciones de detección individuales pueden distribuirse por los medios habituales, entre ellos los enlaces fijos, el teléfono, Internet, etc.

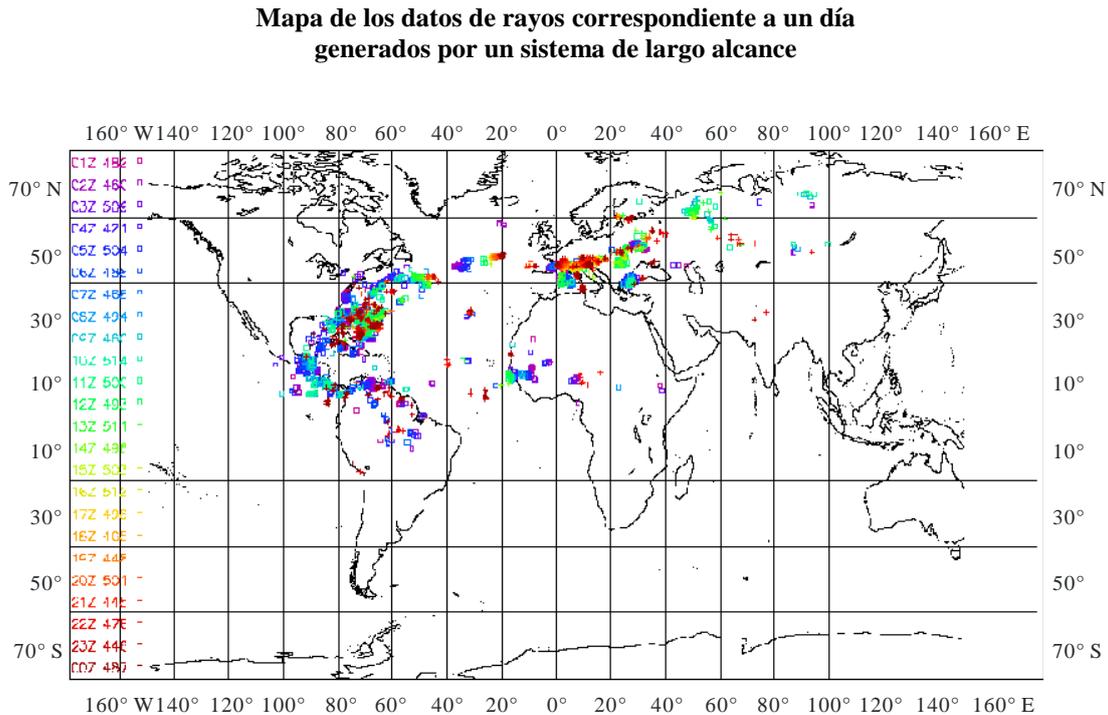
En los actuales sistemas operativos, la posición del rayo se determina ya sea midiendo la dirección de llegada de la onda esférica asociada (onda atmosférica) o el tiempo de llegada de la onda esférica o una combinación de ambos.

Las mediciones deben ser efectuadas en más de tres lugares de detección bastante espaciados. El número de emplazamientos que se suele utilizar suele ser mayor que el mínimo a fin de mejorar la fiabilidad de las ubicaciones señaladas. Los sistemas basados en el tiempo de llegada suelen proporcionar ubicaciones más precisas que los sistemas basados en la localización de la dirección en las observaciones efectuadas a una distancia de cientos de kilómetros. Esto se debe a que la dirección de recepción de las señales ionosféricas captadas en el emplazamiento suele ser ligeramente diferente de la dirección real de descarga, variando en función del estado de las capas superficiales cerca del lugar de detección. Los sistemas basados en el tiempo de llegada suelen utilizar principalmente las señales de radionavegación GPS para obtener la sincronización temporal necesaria en los diferentes lugares de detección. Todos los sistemas utilizan comunicaciones eficaces y fiables entre los emplazamientos remotos y el procesador central. La frecuencia radioeléctrica utilizada para la localización de la actividad de rayos varía en función de la zona de supervisión necesaria y del fin específico del sistema.

La localización a distancias de varios miles de kilómetros, se efectúa en la práctica observando las frecuencias centradas en 10 kHz (2-15 kHz) (véase la Figura 6-2), tales como el sistema ATDNET explotado por el Metoffice del Reino Unido. En este sistema, las ondas esféricas se reciben en estaciones periféricas remotas ubicadas en el mundo entero y separadas hasta 2000 km. Las ondas esféricas se someten a un análisis de Fourier y se les introduce una indicación de tiempo en los lugares de emplazamiento de los sensores. Las muestras temporizadas se transmiten inmediatamente a la estación de control donde se calculan las descargas de los rayos a partir de las diferencias de los tiempos de llegada a los emplazamientos. Los niveles de interferencia bajos a veces pueden contrarrestarse utilizando un filtro de ranura ajustable en los emplazamientos del sensor afectado, pero las interferencias muy extendidas y de mayor nivel son muy perjudiciales para el funcionamiento del sistema.

Teniendo en cuenta la importancia de esas redes de detección de rayos a larga distancia y la necesidad de un reconocimiento mundial, la CMR-12 efectuó una atribución específica al servicio de ayudas a la meteorología, limitada a los sensores pasivos, en la banda 8,3-11,3 kHz.

FIGURA 6-2



11 581 informes de tormentas eléctricas en este periodo de 24 horas.

Meteo-06-02

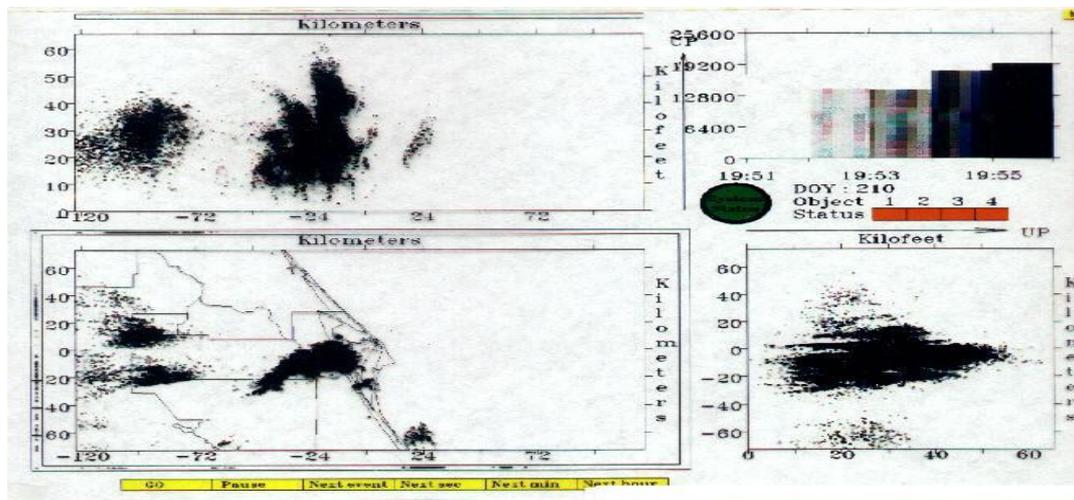
Los sistemas operativos más utilizados cubren en detalle una zona más limitada. En este caso, la onda esférica se observa a frecuencias superiores centradas en torno a 200 kHz (los receptores de banda ancha utilizados son más sensibles en el centro del intervalo de 1 kHz a 350 kHz) y los lugares de detección suelen estar separados entre 100 km y 400 km, en función de que el objetivo sea los rayos dirigidos desde las nubes a la tierra o los que se producen entre nubes. A estas frecuencias tan altas, las descargas desde las nubes a la tierra pueden identificarse por la brusca subida en amplitud que define el borde anterior de la onda esférica. El tiempo de llegada de este frente anterior puede determinarse con exactitud. Los tiempos obtenidos en los emplazamientos de la red se transmiten a un procesador central y se utilizan para calcular las posiciones de las descargas. En muchos casos, las redes de detección de diferencias de los tiempos de llegada funcionan en combinación con los sistemas magnéticos de detección de dirección instalados en años anteriores. [Holle y López, 1993] examinan diversos sistemas de detección de rayos y [Diendorfer y otros, 1994] analizan las observaciones de su propia red situada en Austria.

Por otra parte, en ciertas áreas hay que observar todas las descargas eléctricas asociadas con la actividad tormentosa, ya sean descargas de las nubes al suelo o entre nubes. Esto se efectúa mediante la observación a frecuencias mucho más altas (el sistema de detección y determinación de la distancia de los rayos (LDAR, *lightning detection and ranging*) utiliza 63 MHz y 225 MHz, mientras que el sistema de vigilancia y alerta contra el rayo por interferometría radioeléctrica SAFIR (Surveillance et Alerte Foudre par Interférométrie Radioélectrique) utiliza de 110 a 118 MHz). La Figura 6-3 muestra la pantalla LDAR en tiempo real. Las tormentas deberán quedar dentro de la línea de visibilidad directa cuando deba observarse toda la actividad. Esto exige que los sensores de tierra estén situados de acuerdo con una configuración de línea de base muy corta – los sensores han de estar separados 30 km y a una distancia del suelo de 50 m aproximadamente para satisfacer los criterios de horizonte del radar. En la práctica, no obstante, algunos sistemas operacionales de observación de la actividad entre nubes funcionan con una separación de los sensores en tierra bastante mayor, apoyándose en los sistemas de nubes a tierra, de frecuencias inferiores, para suministrar el detalle de las descargas a niveles inferiores.

El panel inferior izquierdo de la Figura 6-3 muestra datos LDAR en un mapa de la costa Este de Florida (sólo parte de ella). Después los datos se proyectan en un panel Este-Oeste en función de la altitud (superior izquierda) y Norte-Sur en función de la altitud (inferior derecha). (Obsérvese que este panel está girado 90 grados a un lado.) Hay un histograma (superior derecha) que muestra los datos en cinco incrementos de un minuto.

FIGURA 6-3

**Pantalla LDAR en tiempo real**



Meteo-06-03

**6.7 Teledetección desde tierra**

El sondeo atmosférico vertical que utiliza teledetección pasiva desde satélites se describe detalladamente en la sección 5.1. Los meteorólogos que elaboran predicciones locales detalladas y los científicos que investigan los límites planetarios necesitan sondeos atmosféricos de mejor resolución vertical cerca del suelo que la que facilitan los sistemas de satélites.

Un modo de obtener esta información es utilizar la teledetección pasiva de orientación cenital mediante radiómetros instalados en la superficie terrestre. Estos radiómetros utilizan una serie de canales en la banda del oxígeno, entre 50 GHz y 58 GHz, para efectuar mediciones estructurales de la temperatura. Los canales comprendidos entre 21 GHz y 24 GHz se utilizan para suministrar información sobre la variación vertical del contenido de vapor de agua y una ventana de observación en la región de 30 GHz se utiliza para la identificación de las nubes. La medición del contenido del vapor de agua también se beneficia de observaciones adicionales en los segmentos inferiores de la banda de absorción de vapor de agua a 183 GHz (por confirmar).

Aunque los canales destinados a la teledetección en tierra de la temperatura y la humedad se encuentran en una región similar a los de la teledetección pasiva desde satélites, en general utilizan bandas más anchas, incluidas bandas compartidas con otros servicios. En algunas bandas de frecuencias, en particular las indicadas en el número **5.340** del RR, los radiómetros en tierra se benefician de la misma protección que la teledetección por satélite pero, en otras bandas, los radiómetros en tierra necesitarían una protección correspondiente. El número de radiómetros en tierra en funcionamiento sigue siendo relativamente pequeño pero se espera instalar un gran número de ellos en futuro próximo. Tal vez haya que definir un método práctico de compartición consistente en ubicar los radiómetros de modo que se eviten las interferencias de otros servicios.

La teledetección pasiva de otros elementos atmosféricos, como el ozono (en particular a 142 GHz) se beneficia asimismo del aumento del número de emplazamientos radiométricos en tierra.

## 6.8 Sistemas de aeronaves no tripuladas

Los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS, *unmanned aircraft systems*) cada vez adquieren más importancia en las observaciones meteorológicas y de la Tierra. Los UAS satisfacen los requisitos de observación en zonas donde no pueden instalarse sistemas tradicionales, donde no es posible realizar vuelos con aeronaves tripuladas debido a la larga duración del vuelo y donde existen condiciones peligrosas (p.ej. huracanes, ciclones). El funcionamiento de los UAS (2008) a efectos meteorológicos normalmente hace uso de espectro sin licencia para el mando y control de la aeronave, aunque algunos sistemas emplean frecuencias con su correspondiente licencia. Los UAS se utilizan en aplicaciones que incluyen lanzamientos rutinarios de radiosondas con paracaídas sobre zonas oceánicas donde los datos de la radiosonda normalmente se pierden, vuelos en el interior de huracanes y ciclones para la recopilación de datos *in situ*, reconocimiento aéreo de zonas afectadas por condiciones climatológicas o sequías severas y supervisión de la fusión de hielo ártico.

El empleo de UAS a efectos meteorológicos mejora la predicción de las zonas que van a resultar dañadas por un huracán, amplía la antelación con que puede advertirse al público en general y permite lograr una mejor comprensión del clima. Además de para el mando y control del UAS, se necesita espectro para la transmisión de datos de carga útil. Este espectro podría encontrarse en bandas adecuadas atribuidas para fines meteorológicos (MetAids) o, dependiendo del volumen de datos, en otras bandas de frecuencias.

## Referencias

- ALLEN, R. H, BURESS, D. W. y DONALDSON, R. J. [1981] *Attenuation Problems Associated with a 5 cm Radar*, Bulletin of the American Meteorological Society, 62, No. 6, junio de 1981.
- BEAN, B. R. y DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology*, National Bureau of Standards Monograph 92, US Government Printing Office, Washington DC, Estados Unidos.
- BURROWS, C. R. y ATWOOD, S. S. [1949] *Radio Wave Propagation, Consolidated Summary Technical Report of the Committee on Propagation of the National Defense Research Committee*, Academic Press, New York, Estados Unidos.
- COSTER, A. J., NIELL, A. E., BURKE, H. K. y CZERWINSKI, M. G. [17 de diciembre de 1997] The Westford water vapor experiment: use of GPS to determine total precipitable water vapour. MIT/Lincoln Laboratories.
- DIENDORFER y otros, [1994] Results of performance analysis of the Austrian lightning location network. ALDIS, 22ª Conferencia Internacional sobre Protección contra Rayos, Budapest, Hungría.
- DOVIK, R. J. y ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, Estados Unidos de América.
- DOVIK, R. J. y ZRNIC, D. S. [1993] *Doppler radar and weather observations*, 2ª Ed. Academic Press, Inc., San Diego, Estados Unidos de América.
- DOVIK, R. J., ZRNIC, D. y SIRMANS, D. [noviembre de 1979] *Doppler Weather Radar. Proc. IEEE*, Vol. 67, 11.
- DOVIK, R. J., SIRMANS, D., ZRNIC, D., Y WALKER, G. B. [1978] *Considerations for Pulse-Doppler Radar Observations of Severe Thunderstorms*, Journal of Applied Meteorology, 17 No. 2, febrero de 1978, American Meteorological Society.
- FABRY, F. [2015] *Radar Meteorology – Principles and Practice*, Cambridge University Press, University Printing House, Cambridge, Reino Unido.
- GOSSARD, E. E. y STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*. Elsevier, New York, Estados Unidos de América, 280 páginas.
- HITSCHFELD, W. y BORDAN, J. [1954] *Errors Inherent in the Radar Measurement of Rainfall at Attenuating Wavelengths*, Journal of Meteorology, 11, febrero de 1954, American Meteorological Society.

- HOLLE, R. L. y LOPEZ, R. E. [1993] Overview of real-time lightning detection systems and their meteorological uses. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-102, National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, Estados Unidos de América, p. 68.
- IEEE [2002] *IEEE Standard Letter Designations for Radar Frequency Bands*, IEEE New York, Estados Unidos.
- PALMER, R. y ISOM, B. [febrero de 2006] Mitigation of Wind Turbine Clutter on the WSD88D Network. School of Meteorology. University of Oklahoma, Radar Operations Center Presentation.
- RHEINSTEIN, J. [1968] *Backscatter from Spheres: A Short Pulse View*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **AP16**, No. 1, enero de 1968.
- SIRMANS, D. *WSR-88D Antenna Polarization Change*, Titan Corporation, report to the WSR-88D Operational Support Facility, 15 de enero de 1993, available from the WSR-88D Radar Operations Center.
- RYZHKOV, A. y ZRNIC, D. [2005], *Radar Polarimetry at S, C, and X Bands Comparative Analysis and Operational Implications*, 32nd Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society.
- SKOLNIK, M., [1990] Radar Handbook, Ch. 6, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, New York, Estados Unidos.
- ZRNIC, D. S., KENNAN, T., CAREY, L. D y MAY, P. [2000] *Sensitivity Analysis of Polarimetric Variables at a 5-cm Wavelength in Rain*, Journal of Applied Meteorology, **39**, septiembre de 2000.

## Textos del UIT-R

- Recomendación UIT-R F.699-7 – Diagramas de radiación de referencia de antenas de sistemas inalámbricos fijos para utilizarlos en los estudios de coordinación y en la evaluación de la interferencia en la gama de frecuencias de 100 MHz a unos 70 GHz
- Recomendación UIT-R F.1245-2 – Modelo matemático de diagramas de radiación media y diagramas conexos para antenas de sistemas fijos inalámbricos punto a punto con visibilidad directa para aplicarlo en ciertos estudios de coordinación y en la evaluación de la interferencia en la gama de frecuencias de 1 GHz a unos 70 GHz
- Recomendación UIT-R M.1652-1 – Selección dinámica de frecuencias en sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local, para proteger el servicio de radiodeterminación en la banda de 5 GHz
- Recomendación UIT-R M.1849-1 – Aspectos técnicos y operacionales de los radares meteorológicos en tierra
- Recomendación UIT-R RS.515 – Bandas de frecuencias y anchuras de banda utilizadas para la detección pasiva por satélite
- Recomendación UIT-R RS.577 – Bandas de frecuencias y anchuras de banda requeridas utilizadas para la detección activa desde vehículos espaciales que funcionan en los servicios de exploración de la Tierra por satélite (activo) y de investigación espacial (activo)
- Recomendación UIT-R RS.1166 – Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para sensores activos a bordo de vehículos espaciales
- Recomendación UIT-R RS.2017 – Criterios de calidad de interferencia para la teledetección pasiva por satélite

## Bibliografía

- BROOKNER, E. (Ed.) [1988] *Aspects of Modern Radar*. Artech House, Boston, Estados Unidos de América.
- DIBBERN, J., MONNA, W., NASH, J. y PETERS, G. (Ed.) [marzo de 2000] COST Action 76. Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems, Final Report. European Commission, Directorate-General Science, Research and Development.
- DOVIK, R. J. y ZRNIC, D. S. [1993] Doppler radar and weather observations. Academic Press, Inc., San Diego, Estados Unidos de América.
- DOVIK, R., ZRNIC, D. y SIRMANS, D. [noviembre de 1979] Doppler Weather Radar. Proc. IEEE, Vol. 67, 11.
- ECC Report 90 – Compatibility of wind profiler radars in the Radiolocation Service (RLS) with the Radionavigation Satellite Service (RNSS) in the band 1 270-1 295 MHz.
- ELACHI, DR. C. *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Press, Nueva York, Estados Unidos de América.
- Elena Saltikoff, John Y. N. Cho, Philippe Tristant, Asko Huuskonen, Lynn Allmon, Russell Cook, Erik Becker, y Paul Joe «*The threat to weather radars by wireless technology*» Bulletin of the American Meteorological Society, julio de 2016.
- HOBAN, N. P., CUNNINGHAM, J. G. y Zittel, D. W. [2014] *Estimating Systematic WSR-88D Differential Reflectivity (ZDR) Biases Using Bragg Scattering*, 30<sup>th</sup> Conference on Environmental Information Processing Technology, American Meteorological Society.
- Intercomparison of Techniques to Correct for Attenuation of C-Band Weather Radar Signals. J. Applied Meteorology: Vol. 37, 8, p. 845-853.
- KAWASAKI, Z. I., YAMAMOTO, K., MATSURA, K., RICHARD, P., MATSUI, T., SONOI, Y. y SHIMOKURA, N. [1994] SAFIR operation and evaluation of its performance. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, 12, p. 1133-1136.
- LAW, D. et al. [marzo de 1994] Measurements of Wind Profiler EMC Characteristics, NTIA Report 93-301, 63 páginas. National Telecommunications and Information Administration.
- LEE, A. C. L. [1986] An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. *Quarterly J. R. Meteorological Society*.
- LENNON, C. y MAIER, L. [1991] Lightning mapping system. Proc. of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Cocoa Beach, FL., Estados Unidos de América. NASA Conf. Pub. 3106, Vol. II, p. 89-1, 89-10.
- MAMMEN, T. [1998] Weather radars used by members, WMO instruments and observing methods, Report No. 69.
- MCLAUGHLIN, D. J., CHANDRASEKAR, V., DROEGEMEIER, K., FRASIER, S., KUROSE, J., JUNYENT, F., PHILIPS, B., CRUZ-POL, S. y COLOM, J. [enero de 2005] Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for Improved Detection, Understanding, and Prediction of Atmospheric Hazards. Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteor. Society.
- PROBERT-JONES, J. R. [1962] *The Radar Equation in Meteorology*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 88.
- SESSIONS, W. B. [diciembre de 1995] SARSAT SARP instrument performance when receiving emissions from NOAA 404 MHz wind profiler radars, NOAA, NESDIS, E/SP3, 87 páginas.
- SKOLNIK, M. [1990] Radar Handbook. Second Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, Estados Unidos de América.
- WMO Guide to meteorological instruments and methods of observation, No. 8, World Meteorological Organization.

## Anexo 1

### Acrónimos y abreviaturas de uso común en meteorología

<b>A</b>		ASIC	Circuito integrado específico de la aplicación
A/D	Analógico a digital	ATMS	Sonda de microondas de tecnología avanzada (NPOESS/NASA)
AAAS	American Association for the Advancement of Science	ATOVs	Sonda vertical operacional TIROS avanzada
AARS	Sistema de información automática de aviones	ATSR	Radiómetro de exploración longitudinal de la traza
ABSN	Red sinóptica antártica básica	AVCS	Sistema de videocámara avanzado
ACARS	Sistema de direccionamiento e información para comunicaciones con aviones	AVHRR	Radiómetro avanzado de muy alta resolución
ACCAD	Comité Asesor sobre Aplicaciones y Datos Meteorológicos	AWIPS	Sistema de proceso de la información meteorológica avanzado
ACMAD	Centro Africano de Aplicaciones Meteorológicas para el Desarrollo	<b>B</b>	
ADAS	Sistema de adquisición de datos en aviones	BCD	Decimal codificado en binario
ADC	Convertidor analógico/digital	BER	Proporción de bits erróneos
ADEOS	Satélite de observación avanzada de la Tierra (Japón)	BPS	Bits por segundo
ADP	procesamiento automático de datos	BR	Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT
ADPE	Equipos de procesamiento automático de datos	BW	Anchura de banda
AFOS	Sistema automático de predicción y observación	<b>C</b>	
AGRHYMET	Centro Regional de Formación en Agrometeorología e Hidrología Operacional y sus Aplicaciones	C&DH	Tratamiento de instrucciones y datos
AIRS	Sonda de infrarrojos avanzada (instrumento de la NASA)	$C/N_0$	Índice de densidad portadora/ruido
ALC	Control automático de nivel	CAD	Convertidor analógico/digital
AMDAR	Retransmisión de datos meteorológicos de aviones	CaeM	Comisión para la Meteorología Aeronáutica
AMI	American Meteorological Society	CAF	Control automático de frecuencia
AMSR	Sonda de temperaturas meteorológicas avanzadas	CAG	Control automático de ganancia
ANSI	American National Standards Institute	CAgM	Comisión para la Meteorología Agrícola
AOPC	Grupo de Expertos en observación atmosférica del clima	CAS	Comisión para las Ciencias Atmosféricas)
AOS	Adquisición de la señal	CBS	Comisión para los Sistemas Básicos
AP	Amplificador de potencia	CCD	Dispositivo de acoplamiento de cargas
APT	Transmisión automática de imágenes	CCIR	Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (véase UIT-R)
ARGOS	Sistema de captura y localización de datos en los satélites de la serie NOAA	CCI	Comisión para la Climatología
ASCII	Código normalizado americano para el intercambio de información	CCRS	Centro de Teledetección de Canadá
		CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
		CDA	Telemando y adquisición de datos
		CDAS	Estación de telemando y adquisición de datos
		CEM	Compatibilidad electromagnética
		CEOS	Comisión de Satélites de Observación de la Tierra

<b>C (cont.)</b>		CPR	Radiómetro físico de nubes o reanimación cardiopulmonar
CEPMMP	Centro Europeo de Previsión Meteorológica a medio plazo	CPU	Unidad Central de Proceso
CERES	Sistema de energía radiactiva de las nubes y la Tierra	CRC	Verificación por redundancia cíclica/código de redundancia cíclica
CGMS	Co-ordination Group for Meteorological Satellites (Grupo de Coordinación sobre Satélites Meteorológicos)	CrIS	Sonda de infrarrojos transversal a la trayectoria (instrumento NPOESS)
CIEM	Consejo Internacional para la Exploración del Mar	CrMIS	Sonda-captador de imágenes de microondas transversal a la trayectoria (instrumento NPOESS)
CIESIN	Consortium for International Earth Science Information Networks	CRT	Tubo de rayos catódicos
CIMO	Comisión para los instrumentos y los métodos de observación	CSA	Agencia Espacial de Canadá
CIMSS	Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies	CS&C	Conmutación y control de comunicaciones (segmento CDA del sistema GMACS)
CIUC	Consejo Internacional de Uniones Científicas	CSIRO	Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth
CLICOM	Informática del clima	CSIS	Sistema de información centralizada sobre tormentas
CLINO	Normales climatológicas	CSM	Supervisión del sistema climático
CLIPS	Servicios de información y predicción climática	CSMA/CD	Acceso múltiple por detección de la portadora con detección de colisiones
CLIVAR	Variabilidad y predictabilidad climática	CSTR	Council for Scientific and Technical Research
CMA	Administración Meteorológica China	CTCS	Sistema de telemetría y telemando CDA (segmento CDA del sistema GIMTACS)
CMD	Instrucción	CW	Onda continua
CMIS	Sonda/captador de imágenes de microondas de exploración cónica (instrumento NPOESS)	CZCS	Explorador en color de zonas costeras
CMM	Comisión para la Meteorología Marina	CHy	Comisión para la Hidrología (OMM)
CMR	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones	<b>D</b>	
CNES	Centro Nacional de Estudios Espaciales	D/A	Digital/analógica
CNIE	Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales	DAAC	Centro de Archivos Activos Distribuido
COADS	Conjunto de datos completo sobre el océano y la atmósfera	DADS	Sistema de archivo y distribución de datos
COI	Comisión Oceanográfica Intergubernamental	DAPS	Sistema de procesamiento automático DCS
CONUS	Estados Unidos Continental	DAS	Sistema de adquisición de datos
COP	Conferencia de las partes	DAS	Sistema de administración de la base de datos
COPUOS	Comisión sobre la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos	DAS	Sistema de acceso directo
CORSSAC	Civil Operational Remote Sensing Satellite Advisory Committee	dB	Decibelio
COSPAS	Sistema de búsqueda y salvamento a bordo de satélite ruso. Véase SARSAT	DB	Radiodifusión directa
CPCSA	Coordinación y actividades complementarias del programa climático	DBMS	Sistema de gestión de la base de datos
		DCP	Plataforma de recogida de datos
		DCPI	Interrogación de las plataformas de recogida de datos
		DCPLS	Sistema de recogida de datos y localización de plataformas
		DCPR	Recepción de las plataformas de recogida de datos
		DCR	Radiómetro de correlación diferencial

<b>D (cont.)</b>		ERBE	Experimento sobre radiación térmica global de la Tierra
DCS	Sistema de recogida de datos	ERL	Laboratorio de Investigación Medioambiental
DEMUX	Demultiplexor	EROS	Satélite de observación de recursos terrestres
DEPIRE	Densidad espectral de potencia isotropa radiada equivalente	ERS	Satélite europeo de teledetección
dfp	Densidad de flujo de potencia	ESA	Agencia Espacial Europea
DIFAX	Facsímil digital	ESD	Descarga electrostática
DIR	Infrarrojo diurno	ESMR	Radiómetro de microondas de barrido electrónico
DLI	Interfaz del enlace descendente (DM/PM)	ETA	Hora prevista de llegada
DLM	Supervisor del enlace descendente	ETM	Modelo de pruebas de ingeniería
DLR	Agencia Espacial Alemana	ETM	Trazador temático ampliado
DMSP	Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa	ETS	Satélite para pruebas de ingeniería
DN	Nodo descendente	EUMETSAT	Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos
DOMSAT	Satélite nacional (comunicaciones)		
DPT	Terminal de imagen digital	EUV	Ultravioleta extremo
DR	Lectura directa	<b>F</b>	
DRGS	Estación terrena de lectura directa	FAX	Facsímil
DS	Sondeo de permanencia o sondeo (nodo operativo GOES-4/7 VAS)	FC	Color falso
DSARS	Sistema de archivo y recuperación del satélite DAMUS	FCC	Composición en color falso
DSB	Baliza de sonda directa	FCC	Federal Communications Commission
DSB	Radiodifusión de sonda directa	FI	Frecuencia intermedia
DSN	Red de comunicaciones con el espacio lejano	FIFO	Primero en entrar, primero en salir
DUS	Sistema de utilización de datos	FOV	Campo de visión
<b>E</b>		fps	Tramas por segundo
EBR	Registrador de haz electrónico	FSS	Sistema informático de planificación de vuelo
EC/AGE	Grupo Asesor del Consejo Ejecutivo sobre el intercambio de calibrado meteorológico y electrónico	FTM	Función de transferencia de modulación
ECMWF	Centro Europeo de Previsión Meteorológica a medio plazo	<b>G</b>	
EDC	Centro de Datos EROS	G/T	Relación ganancia de la antena/temperatura de ruido del sistema (dB/K)
EDIMS	Sistemas de gestión de datos e información medioambiental	GAC	Cobertura global regional
ELT	Transmisor de localización de siniestros	GAME	Experimento GEWEX sobre los monzones de Asia
ELV	Vehículo de lanzamiento no recuperable	GARP	Programa Mundial de Investigación de la Atmósfera
EMI	Interferencia electromagnética	GARS	Sistema de archivo y recuperación del GOES
ENSO	Fenómeno de oscilación meridional de El Niño	GAW	Vigilancia de la atmósfera global
ENVISAT	Satélite medioambiental	GCIP	Proyecto Internacional GEWEX a escala continental
EOS	Satélites de observación de la Tierra	GCM	Modelo de circulación general
EPOCS	Estudios climáticos del Océano Pacífico ecuatorial	GCOS	Sistema mundial de observación del clima
EPS	Sensor de partículas energéticas	GDTA	Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale
ERB	Radiación térmica global de la Tierra	GEO	Órbita terrestre geostacionaria

**G (cont.)**

GEWEX	Experimento mundial sobre la energía y el ciclo hídrico
GHz	Gigahertzio
GIMGSP	Proyecto de sistema de tierra GOES I-M
GIMTACS	Sistema de telemetría y telemando GOES I/M
GIS	Sistemas de información geográfica
GMACS	Sistema de supervisión y control GOES (actualmente GIMTACS)
GMS	Satélite meteorológico geostacionario
GMT	Tiempo medio de Greenwich
GNSS	Sistemas mundiales de navegación por satélite
GOES	Satélite geostacionario operacional del medio ambiente
GOMS	Satélite meteorológico operacional geostacionario
GOOS	Sistema mundial de observación de los océanos
GOS	Sistema mundial de observación
GOSSP	Panel espacial de sistemas de observación mundial
GPCP	Proyecto de climatología de precipitación mundial
GPS	Sistema mundial de determinación de posición
GPSOS	Sensor de ocultación GPS
GRC	Glenn Research Center formerly the Lewis Research Center (LeRC)
GRS	Estación receptora en tierra
GRT	Tiempo real GOES (base de datos)
GSFC	Centro de Vuelos Espaciales Goddard
GSN	Red de superficie SMOC
GSTDN	Ground Spaceflight Tracking and Data Network
GTOS	Sistema mundial de observación de la Tierra
GUAN	Red SMOC de atmósfera superior
GVAR	Variable GOES
GWC	Centro Meteorológico Mundial
<b>H</b>	
H1/3	Altura de onda significativa
HEPAD	Detector de protones y partículas alfa de alta energía
HiRID	Datos del captador de imágenes de alta resolución
HIRS	Sonda en infrarrojo de gran resolución (instrumento TIROS)

HOMS	Subprograma de hidrología operativa para fines múltiples
HRD	Día de investigación de huracanes
HRD (10)	Día de investigación de huracanes – El GOES-Este explora cada 10 min en instantes predeterminados
HRIS	Sonda de infrarrojos de alta resolución o sonda interferométrica de alta resolución
HRPT	Transmisión de imágenes de alta resolución
HRSD (S)	Día de exploración rápida de huracanes (estereofónica) el GOES-Este y el Oeste exploran cada 7 1/2
Hz	Hercio (antes ciclos por segundo)
<b>I</b>	
I/O	Entrada/salida
I/S	Captador de imágenes y sonda
I+D	Investigación y desarrollo
IAHS	Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas
IAMAS	Asociación Internacional de Ciencias Meteorológicas y Atmosféricas
IASI	Interferómetro de sonda atmosférica de infrarrojos
ICES	Consejo Internacional para la Exploración del Mar
ICSAR	International Committee for Search and Rescue
ICSU	Consejo Internacional de Uniones Científicas
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFOV	campo instantáneo de visión
IFRB	Junta Internacional del Registro de Frecuencias, véase BR
IGBP	Programa Internacional Geosfera-Biosfera
IGF	Servicio de generación de imágenes
IGFOV	Campo geométrico instantáneo de visión
IGOSS	Integrated Global Ocean Services System
IHP	Programa Hidrológico Internacional
INDOEX	Experimento del Océano Índico
INPE	Instituto de Investigaciones Espaciales
INR	Navegación y registro de imágenes
INR	Relación interferencia a ruido
INSAT	Satélite indio
IOC	Comisión Oceanográfica Intergubernamental

<b>I (cont.)</b>		LGSOWG	LANDSAT Ground Station Operations Working Group
IODE	Comité de la COI sobre intercambio internacional de datos e información	LHCP	Polarización circular levógira
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático	LIDAR	Detección y localización por ondas luminosas
IR	Infrarrojo	LMT	Hora media local
IRIG	Inter-Range Instrumentation Group	LOS	Pérdida de la señal
IRIS	Espectro interferómetro de infrarrojos	LPA	Amplificador de baja potencia
IRS	Satélite de teledetección indio	IPD	Detector de presencia IF (CDA)
IRU	Unidad de referencia inercial	lpi	Líneas por pulgada
ISSETAP	Intergovernmental Science Engineering & Technology Advisory Panel	lpm	Líneas por minuto
ISO	Organización Internacional de Normalización	LRIT	Transmisión de la información a baja velocidad
ITOS	Sistema operacional TIROS mejorado	LRPT	Transmisión de imágenes de baja resolución
ITPR	Radiómetro de determinación de perfil de temperaturas de infrarrojos	LUT	Tabla de consulta o terminal de usuario local
<b>J</b>		LW	Onda larga
JDIMP	Grupo Mixto de Expertos sobre gestión de datos e información SMOC/SMOO/SMOT	LWIR	Infrarrojos de onda larga
JERS	Satélite japonés de recursos terrestres	<b>M</b>	
JIC	Centro Conjunto sobre el Hielo	MA	Modulación de amplitud
JMA	Japan Meteorological Agency	mb	Milibares
JPL	Jet Propulsion Laboratory	Mbit/s	megabits por segundo
JSC	Joint Scientific Committee Johnson Space Center	Mbps	Megabits por segundo
JSTC	Comité Mixto Científico Técnico	MBps	Megabytes por segundo
<b>K</b>		MCC	Centro de Control de la Misión
K	Kelvin	MCDW	Datos climáticos mundiales mensuales
kb	kilobit(s)	MCS	Soporte del canal de humedad
kB	kilobyte(s)	MDF	Multiplexación por división de frecuencia
kbit/s	Kilobits por segundo	MDHS	Sistema de tratamiento de datos meteorológicos
keV	Kiloelectrón-voltios	MDP	Modulación por desplazamiento de fase
kHz	Kilohercio	MDP-2	Modulación por desplazamiento de fase binaria
KSC	Kennedy Space Center	MDP-4	Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria
KSPS	Miles de muestras por segundo	MDP-4D	Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria descentrada
<b>L</b>		MDT	Múltiplex por división en tiempo
LANDSAT	Satélite de teledetección terrestre de Estados Unidos de América	MDUS	Estaciones de utilización de datos a media escala
LANDSAT-TM	Trazador temático cartográfico LANDSAT	MEO	Órbita terrestre media
LaRC	Langley Research Center	MEPED	Detector de protones y electrones de media energía
LAT/LON	Latitud/Longitud	MetAids	Ayudas a la meteorología
LE	Levantamiento de puntos de referencia	METEOSAT	Satélite meteorológico geoestacionario europeo
LEO	Órbita terrestre baja	METOP	Satélite meteorológico europeo de órbita polar
LEOP	Fase de lanzamiento y de inicio de la órbita	MetSat	Satélite meteorológico
LeRC	Véase GRC		

<b>M (cont.)</b>		NHS	Servicio Hidrológico Nacional
MeV	Megaelectrón-voltio	NIR	Infrarrojo nocturno o próximo al infrarrojo
MeV/n	Megaelectrón voltios por nucleón	NMC	Centro Meteorológico Nacional
MF	Modulación de frecuencia	NMS	Servicio Meteorológico Nacional o Servicio Hidrometeorológico
MHS	Sonda de humedad de microondas	NNODS	Sistema de datos oceánicos NOAA/NOSS
MHz	Megahercios	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MIA	Modulación de impulsos en amplitud	NOAA	METSAT polar
MIC	Modulación por impulsos codificados	NOS	Centro Nacional de Estudios Oceánicos
MID	Modulación de impulsos en anchura	NPOESS	Sistema nacional de satélite medioambiental operacional de órbita polar
μrad	Microrradián	NRCT	National Research Council of Thailand
μs	Microsegundo	NROSS	Navy Remote Ocean Sensing System
MLS	Sonda de limbo de microondas	NRSA	National Remote Sensing Agency
MODEM	Modulador/demodulador	NRZ	Sin retorno a cero
MODIS	Espectrorradiómetro captador de imágenes de resolución moderada (instrumento de la NASA)	NRZ-L	Sin retorno al nivel cero
MOPITT	Medición de la contaminación troposférica (NASA)	NSSFC	National Severe Storms Forecast Center
MOS	Satélite de observación marina (Japón)	NSSL	National Severe Storms Laboratory
MP	Modulación de fase	nT	Nanotesla
MPERSS	Sistema de soporte de respuesta a emergencias de polución marina	NWP	Predicción meteorológica numérica
mr	Milirradianes	NWS	Servicio Meteorológico Nacional
MSFC	Marshall Space Flight Center	<b>O</b>	
MSI	Captación de imágenes multiespectral	O&M	Operaciones y mantenimiento
MSS	Analizador multiespectral	OAD	Determinación de la órbita y de la actitud
MSU	Sonda de microondas	OAR	Oficina de Investigación Oceánica y Atmosférica
MTBF	Tiempo medio entre fallos	OCTS	Sensor de temperatura de color del océano
MTF	Función de transferencia de modulación	OHP	Programa hidrológico operacional
MUX	Multiplexor	OMI	Instrumento de medición del ozono
MW	Volante inercial, onda media, microondas, megavatio	OMM	Organización Meteorológica Mundial
<b>N</b>		OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite (NPOESS)
N/S	Norte/Sur	OOPC	Ocean Observations Panel for Climate
NASA	National Aeronautics and Space Administration	<b>P</b>	
NASCOM	NASA Communications Network	p.i.r.e.	Potencia isotrópica radiada equivalente
NASDA	National Space Development Agency	P/SEC	Impulsos por segundo
NCDC	Centro Nacional de Datos Climáticos	PDL	Carga de datos del procesador
NE-delta-N	Equivalente de ruido del cambio de radiancia	PDR	Retransmisión de datos procesados (enlace de RF GVAR)
NE-delta-T	Equivalente de ruido del cambio de temperatura	PE	Ecuación primitiva
NERC	National Environmental Research Council (Consejo Nacional de Investigación Medioambiental)	PEP	Potencia de cresta de la envolvente
NESDIS	National Environmental Satellite Data and Information Service		
NF	Factor de ruido		
NHC	National Hurricane Center		

<b>P (cont.)</b>		S/C	Vehículo espacial
PEP	Protección contra errores en los polinomios (NASA)	S/N	Relación señal/ruido
PHI	Programa Hidrológico Internacional	S/N <sub>0</sub>	Relación de densidad señal/ruido
PIGB	Programa Internacional Geosfera-biosfera	SAD	Datos auxiliares de la sonda
p.i.r.e.	Potencia isotropa radiada equivalente	SAGE	Experimentos sobre aerosoles y gases estratosféricos
Píxels	Elementos de imagen	SAR	Radar de abertura sintética o búsqueda y salvamento
PKM	Motor impulsor de perigeo	SARSAT	Seguimiento por satélite de búsqueda y salvamento, véase COSPAS
PLL	Bucle enganchado en fase	SATCOM	Comunicaciones por satélite
PN	Pseudoruido	SBUV	Ultravioleta de retrodispersión solar
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente	SC/N <sub>0</sub>	Relación de densidad subportadora/ruido
POES	Satélite medioambiental operacional de órbita polar	SC/OES	Subcomité sobre satélites medioambientales operacionales
P-P	Cresta a cresta	SC/OMS	Subcomité sobre satélites meteorológicos operacionales
PPM	Partes por millón	SCIAMACHY	Espectrómetro de absorción de exploración y captura de imágenes para la cartografía atmosférica
PPS	Impulsos por segundo	SCO	Oscilador de subportadora
PR	Radar de precipitación	SCSMEX	Experimento sobre los monzones en el Mar del Sur de China
PRF	Frecuencia de repetición de impulsos	SCHOTI	Conferencia Permanente de Directores de Institutos de Formación de los Servicios Meteorológicos Nacionales
PROFS	Program for Regional Observing and Forecasting Service	SDUS	Estación de usuario de datos secundarios
PROMET	Grupo de Trabajo sobre el suministro de información meteorológica	SeaWiFS	Sensor de gran campo de visión para la observación del mar
<b>Q</b>		SEC	Segundo
QC	Control de calidad	SEM	Aparato de observación del medio espacial
<b>R</b>		SET	Satélite de exploración de la Tierra
R	Rayleigh	SETS	Servicio de exploración de la Tierra por satélite
R&D	Investigación y desarrollo	SEU	Perturbación frente a un evento
R/Y	Balanceo y guiñada	SFS	Servicio fijo por satélite
RA	Altímetro de radar	SGISO	Sistema global integrado de servicios oceánicos
RLS	Radiobaliza de localización de siniestros	SGLS	Sistema de enlace espacio-Tierra
RBSN	Red sinóptica básica regional	SIGWX	Tiempo significativo
RCS	Sistema de control de reacción	SIR	Radar de captación de imágenes del transbordador espacial
RF	Radiofrecuencia	SIRS	Espectrómetro infrarrojo de satélite
RFI	Interferencia de radiofrecuencia	SIT	equipo de implementación estratégica del CEOS
RGB	Rojo/verde/azul	SLAR	Radar de exploración lateral aerotransportado
RH	Humedad relativa	SMO	Sistema mundial de observación
RHCP	Polarización circular dextrógira	SMOC	Sistema mundial de observación del clima
RMDCN	Red regional de comunicaciones de datos meteorológicos		
RMS	Valor eficaz		
RPM	Revoluciones por minuto		
RSS	Ley cuadrática		
RSU	Unidad de teledetección		
RT	Tiempo real		
RW	Volante de reacción		
RWA	Conjunto del volante de reacción		
<b>S</b>			

**S (cont.)**

SMOO	Sistema mundial de observación de los océanos
SMOT	Sistema mundial de observación de la Tierra
SMS	Servicio móvil por satélite
SMSSM	Sistema mundial de socorro y seguridad marítimos
SMT	Sistema mundial de telecomunicación
SN	Red espacial
SOCC	Spacecraft Operations Control Center
SOES	Subcomité sobre satélites medioambientales operacionales
SOLAS	Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar
SPM	Captador de protones solares
SPOT	Satélite experimental de observación de la Tierra
SPREP	Programa Regional del Medio Ambiente para el Pacífico Sur
SQPSK	Modulación por desplazamiento alternado de fase en cuadratura ( <i>stagered QPSK</i> )
SR	Radiómetro de exploración
sr	Estereorradián
SR-IR	Canal infrarrojo del radiómetro de exploración
SR-VIS	Canal visible del radiómetro de exploración
SSA	Actividades de apoyo al sistema WWW
SSM/I	Generador de imágenes de microondas de sensor especial
SST	Temperatura de la superficie del mar
SSU	Equipo de sondeo estratosférico
STA	Science and Technology Agency
STC	Comité Científico y Técnico
Ster	Estereorradián
STS	Sistema de transporte espacial
S-VAS	Sonda atmosférica con radiómetro de barrido giratorio en el infrarrojo visible ampliado
S-VISSR	Radiómetro de barrido giratorio en el infrarrojo visible ampliado
SW	Onda corta
SW	Conmutador o central
SWIR	Infrarrojo de onda corta
SXI	Captador de imágenes de rayos X solares
SXT	Telescopio de rayos X solares (misión solar-A)

**T**

T&C	Telemetría y telemando
T/P	Topex/Poseidon
T/V	Vacío térmico
TAD	Telemando y adquisición de datos
TBUS	Sigla de cuatro letras de los mensajes de datos Ephemeris
TDRS	Satélite de seguimiento y retransmisión de datos
TDRSS	Sistema de satélites de seguimiento y retransmisión de datos
TED	Detector de energía total o aparejo excluidor de tortugas
TEMS	Sistema de supervisión del ecosistema terrenal
TES	Espectrómetro de emisión troposférica
TIP	Procesador de información TIROS
TIR	Infrarrojo térmico
TIROS	Satélite de observación por televisión sensible al infrarrojo
TLM	Telemetría
TM	Trazador cartográfico temático
TMI	Captador de imágenes de microondas TRMM
TMR	Radiómetro de microondas Topex
TO	Órbita de transferencia
TOGA	Océanos tropicales y atmósfera mundial
TOMS	Espectrómetro de distribución del ozono total
TOPC	Grupos de Expertos de observación terrestre para el clima
TOS	Sistema operacional TIROS
TOVS	Sonda vertical operacional TIROS
TRF	Transformada rápida de Fourier
TRMM	Misión de medida de la precipitación tropical
TRUCE	Experimento climático urbano tropical
TT&C	Seguimiento telemando y telemedida
TV	Vacío térmico o televisión
TVM	Modalidad VAS transparente
<b>U</b>	
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (anteriormente CCIR)
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UTC	Tiempo Universal Coordinado
UV	Ultravioleta

<b>V</b>		<b>WCDMP</b>	Programa de datos y supervisión del clima del mundo
VAG	Vigilancia de la atmósfera global	<b>WCFP</b>	Programa mundial de datos climáticos
VAS	Sonda atmosférica VISSR	<b>WCP</b>	Programa mundial del clima
VCP	Programa de cooperación voluntaria	<b>WCRP</b>	Programa mundial de investigación del clima
VDB	Base de datos VISSR		
VDUC	Centro de utilización de datos VAS	<b>WDC</b>	Centro mundial de datos
VIIRS	Conjunto de captador de imágenes en el infrarrojo visible y de radiómetro (Instrumento NPOESS)	<b>WEFAX</b>	Facsímil meteorológico
		<b>WHYCOS</b>	Sistema mundial de observación del ciclo hidrológico
VIP	Procesador de imágenes VAS (SPS de corriente P/DU)	<b>WSFO</b>	Weather Service Forecast Office
VIRGS	Sistema de registro de imágenes y cuadrulado VISSR	<b>WSFO-Tap</b>	Radioenlace terrestre de comunicaciones del WSFO para datos GOES
VISSR	Radiómetro de barrido giratorio en el espectro visible e infrarrojo	<b>WWRP</b>	Programa Mundial de Investigación Atmosférica
VMM	Vigilancia Meteorológica Mundial	<b>WWW</b>	Vigilancia Meteorológica Mundial
VOS	Barco voluntario de observación	<b>WX</b>	Tiempo atmosférico
VREC	Grabador de datos de radiómetro de muy alta resolución	<b>X</b>	
VSWR	Relación de onda estacionaria	<b>XBT</b>	Batitermógrafo no recuperable
VTPR	Radiómetro de medida del perfil vertical de la temperatura	<b>XRI</b>	Captador de imágenes de rayos X
		<b>XRS</b>	Sensor de rayos X (solares)
<b>W</b>		<b>Y</b>	
WAFC	Centro de predicciones de ámbito mundial	<b>yr</b>	Año
WCASP	Programa de aplicaciones y servicios del clima mundial	<b>Z</b>	
WCDA	(Estación de) adquisición de telemando y datos Wallops)	<b>Z</b>	Abreviatura usual de hora del meridiano de Greenwich u hora universal

---





Unión  
Internacional de  
Telecomunicaciones  
Place des Nations  
CH-1211 Ginebra 20  
Suiza

ISBN 978-92-61-24883-3      SAP id



Impreso en Suiza  
Ginebra, 2017

Derechos de las fotografías: Shutterstock